

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи: «Визначення кінематичних характеристик і енергії активації протизносних властивостей палива ТС-1 довготривалого зберігання»:

106 с., 12 рис., 5 табл., 38 джерел.

Об'єкт дослідження – процес зношування агрегатів паливної системи літака.

Предмет дослідження – протизносні властивості сталі ШХ 15 в середовищі палива ТС-1 довготривалого зберігання.

Мета дипломної роботи – експериментально-розрахунковим методом визначити енергію активації поверхневого руйнування сталі ШХ15 в середовищі палива ТС-1 довготривалого зберігання.

Метод дослідження – аналітичним шляхом визначити найбільш підходящі кінетичні моделі і критерії оцінки зносостійкості матеріалів трибосопрямих, розробити фізичну і кінетичну модель і експериментально встановити енергію активації поверхневого руйнування сталі ШХ15 в середовищі палива ТС-1 довготривалого зберігання.

Практичне застосування: розроблена методика дозволяє найбільш точно визначити протизносні властивості палив і мастильних матеріалів на відміну від широко застосовуваних не зроблених методів і методик, які в даний час використовують для оцінки протизносних властивостей палив і олів.

Матеріали дипломної роботи рекомендується використовувати для поповнення банку даних кінетичних параметрів і значень енергії активації поверхневого руйнування сталі ШХ 15 в паливі ТС-1 довготривалого зберігання.

ПАЛИВО ТС-1 ДОГОТРИВАЛОГО ЗБЕРІГАННЯ, ЗНОС, ЗНОШЕННЯ, КІНЕТИЧНА МОДЕЛЬ, КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ, КРИТЕРІЙ ЗНОСОСТІЙКОСТІ, МАСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, МАШИНА ТЕРТЯ, ПОВЕРХНЕВЕ РУЙНУВАННЯ, ТРИБОКІНЕТИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ, ТРИБОСПРЯЖЕННЯ, ЕНЕРГІЯ АКТИВАЦІЇ

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ | 7 |
| ВСТУП..... | 8 |
| 1 КІНЕТИЧНІ МОДЕЛІ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТРИБОСПРЯЖЕНЬ | 11 |
| 1.1 Фізико-хімічні (кінетичні) моделі поверхневого руйнування матеріалів трибоспряжень | 11 |
| 1.2 Критерії оцінки зносостійкості матеріалів трибоспряжень | 23 |
| Висновки до розділу 1..... | 31 |
| 2 МЕТОДИКА І ВИБІР ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ | 32 |
| 2.1 Методичний підхід | 32 |
| 2.2 Теоретичні передумови трибо-кінетичного описання | 34 |
| 2.3 Вибір об'єктів і машин тертя для проведення трибокінетичного експерименту | 36 |
| 2.4 Статистична оцінка результатів досліджень | 42 |
| Висновки до розділу 2..... | 45 |
| 3 ФІЗИЧНА І КІНЕТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИКА ТРИБОКІНЕТИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ | 46 |
| 3.1 Фізична модель процесів, які враховуються під час механо-хімічного зношування | 46 |
| 3.2 Кінетична модель нормального механо-хімічного зношування | |
| 3.3 Методика трибокінетичного експерименту..... | 50 |
| Висновки до розділу 3..... | 59 |
| 4 ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ АКТИВАЦІЇ ПОВЕРХНЕВОГО РУЙНУВАННЯ СТАЛІ ШХ15 В ПАЛИВІ ТС-1 ДОВГОТРИВАЛОГО ЗБЕРІГАННЯ..... | 60 |
| 4.1 Результати експериментальної оцінки енергії активації поверхневого руйнування сталі ШХ15 в паливі ТС-1 довготривалого зберігання | 60 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.2 | Порівняння значень енергії активації поверхневого руйнування сталі ШХ 15 в паливах ТС-1 та ТС-1 довготривалого зберігання | 68 |
| | Висновки до розділу 4..... | 71 |
| 5 | Охорона праці | 72 |
| 5.1 | Законодавча та нормативна база України про охорону праці..... | 72 |
| 5.2 | Небезпечні та шкідливі виробничі чинники, що діють при технічному обслуговуванні паливної системи літака | 74 |
| 5.3 | Технічні та організаційні заходи для зменшення рівня впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників | 76 |
| 5.4 | Забезпечення пожежної і вибухової безпеки в ангарі | 78 |
| 5.5 | Розрахунок заземлення установки для перевірки герметичності баків-кесонів | 80 |
| 5.6 | Інструкція з охорони праці при технічному обслуговуванні паливної системи літака | 82 |
| | Висновки до розділу 5..... | 85 |
| 6 | ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА..... | 86 |
| 6.1 | Аналіз факторів забруднення навколишнього середовища внаслідок експлуатації повітряних суден | 86 |
| 6.2 | Рекомендації щодо обмеження негативного впливу забруднень та при проведенні робіт з технічного обслуговування повітряних суден..... | 87 |
| 6.2.1 | Заходи щодо обмеження негативного впливу на стічні води, розрахунок нафтопастки та визначення її ефективності..... | 87 |
| 6.2.2 | Заходи щодо обмеження негативного впливу випаровування паливо-мастильних матеріалів на атмосферне повітря та розрахунок циклону..... | 93 |
| | Висновки до розділу 6..... | 102 |
| | ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... | 103 |
| | СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 104 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

ДС - Дисипативні структури

ЕКД - Ентропійний критерій деградування

ЕСТ - Енергоємність системи тертя

НПЗ - Нафтопереробний завод

ПАР - Поверхнево активні речовини

ПМТ - П'ятишарикова машина тертя

РВЕ - Робота виходу електрона

СП - Структурне пристосування

СТ - Система тертя

ТР - Трибологічна реакція

ЧШМ - Чотиришарикова машина тертя

ВСТУП

Зношення та руйнування металів — головні причини виходу з ладу більшості деталей машин та самих машин. У багатьох випадках низька надійність системи або агрегату викликана низькою стійкістю до спрацювання окремих пар тертя або низькою зносостійкістю деяких деталей, які виготовлені з матеріалів з низькою зносостійкістю. Аналіз цих випадків свідчить про те, що під час конструювання не був врахований вплив середовища, у якому працюють деталі, не була врахована зміна властивостей середовища в процесі експлуатації, виготовлені деталі були з матеріалів, які мали скриті дефекти.

Велика група вчених займається дослідженням закономірностей взаємодії середовища і матеріалів. Отримані результати досліджень у своїй роботі використовують конструктори, технологи, експлуатаційники. Але ще далеко не знайдені відповіді на всі запитання, які цікавлять практику. А саме тертя та зношення металів в низькомолекулярних середовищах, серед них і реактивних паливах, довгий час залишалися практично маловивченими. Роботи з вивчення протизносних властивостей палив розпочалися на початку 60-х років. Зараз накопичено експериментальний матеріал, зроблені узагальнення, створені лабораторні методи випробовування.

Серед різноманіття вуглеводневих рідин, які застосовуються на сучасній техніці, можна виділити ту частину, що має молекулярну масу менше 300 і в'язкість при 20° С менше 50 сСт. Умовно цю групу вуглеводневих рідин, яку застосовують у якості палива (бензинів, гасів, дизельних палив) і робочих тіл (рідин для гідросистем, спеціальних рідин і т.п.), відносять до низькомолекулярних.

Про масштаби застосування низькомолекулярних вуглеводневих рідин на техніці говорить той факт, що більш половини всієї нафти, що добувається, переробляється і використовується як різні палива.

Численні і складні агрегати паливних і гідравлічних систем сучасної техніки (насоси, клапани, регулятори, розподільники і т.п.) працюють у середовищі

низькомолекулярних вуглеводневих рідин, які одночасно є змащувальним середовищем. Слід зазначити, що тертя металів, наприклад в авіаційних насосах-регуляторах, відбувається в умовах великих питомих навантажень (до 2000 МПа), швидкостей ковзання (до 2 м/с) і робочих температур (до 120° С). У гідравлічних системах літаків умови роботи агрегатів ще більш складні.

Після розробки спеціальних методів і технічних засобів дослідження протизносних властивостей низькомолекулярних вуглеводневих рідин, наприклад з в'язкістю при 20° С 1—5 сСт, було встановлено, що вони володіють практично помітною здатністю захищати метали які труться від зносу, та мають при однаковій або близькій в'язкості помітне розходження в здатності захищати метали які труться від зносу.

Коли почалася масова експлуатація реактивних літаків і коли надійність паливних агрегатів стала визначати безпеку польотів, дослідники почали приділяти велику увагу протизносним властивостям авіаційних реактивних палив.

Серед трибоспряжень паливних агрегатів, які зазнають тертя найбільш навантаженими є вузли високопродуктивних паливних насосів високого тиску, які перекачують паливо до витратних баків, а також подають це паливо до камер згоряння турбореактивних та турбогвинтових двигунів. Саме зносостійкість цих вузлів багато в чому визначає ресурс і надійність роботи паливних насосів. Найбільш поширені плунжерні, шестеренні і коловоротні насоси. У останніх двох типах насосів має місце лінійний контакт деталей вузлів які зазнають тертя, які перекачують паливо, а в плунжерних насосах сферичний торець плунжера і похила шайба утворюють пару тертя з крапковим контактом.

У даній роботі для проведення трибокінетичного експерименту використовується лабораторний прилад УПС-1, в якому тертя ковзання відтворюється між сферичною поверхнею і площиною. Прийнята схема випробовального вузла імітує умови контактування пари тертя «плунжер — похила шайба» паливних насосів.

Однією з найбільш актуальних задач в триботехніці є уніфікація

триботехнічних випробувань, без вирішення якої не можливо накопичення банків трибологічних даних та ефективність їх застосування в техніці. Рішення цієї проблеми потребувало розробки інваріантних критеріїв зносостійкості матеріалів трибоспряжень. В основу розробки таких критеріїв були покладені фундаментальні закономірності трибології та застосування сучасних методів сумісних наук які вже дозволили отримати результати в теорії і практиці.

В даній роботі використовувалась кінетична модель нормального механо-хімічного зношування при граничному терті. На підставі цієї моделі була розроблена розрахунково-експериментальна методика оцінки кінетичних і енергетико-активаційних характеристик зносостійкості матеріалів трибоспряжень, яка дозволила експериментально вивчати закономірність зміни енергії активації поверхневого руйнування у діапазоні нормального зношування і поглибити уявлення про енергетичну природу структурного пристосування матеріалів під час тертя.

Також у роботі для визначення протизносних властивостей палива ТС-1 довготривалого зберігання застосовується найбільш вдалий критерій оцінки зносостійкості енергія активації поверхневого руйнування E^P , фізичний зміст якої аналогічний фізичному змісту енергії активації хімічних реакцій, тобто це — кількість енергії, яка необхідна для ініціювання і підтримки поверхневого руйнування (зношування), рівна енергетичному бар'єру, подолання якого ініціює структурні зміни, що обумовлюють зношування і є предметом вивчення матеріалознавства, тобто E^P — структурно-енергетичний, матеріалознавський, інтегральний, матричний, інваріантний в діапазоні нормального механо-хімічного зношування критерій оцінки зносостійкості конструкційних матеріалів при заданому мастильному матеріалі або критерію оцінки протизносних властивостей мастильних матеріалів при заданому конструкційному матеріалі.

За допомогою кінетичної моделі нормального механо-хімічного зношування при граничному терті та структурно-енергетичним критерієм E^P були проведені дослідження з оцінки зносу сталей у вуглеводневому середовищі палива РТ, гідравлічної рідини АМГ-10, маслі МК-8.

1 КІНЕТИЧНІ МОДЕЛІ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТРИБОСПРЯЖЕНЬ

1.1 Фізико-хімічні (кінетичні) моделі поверхневого руйнування матеріалів трибоспряжень

Перші кінетичні моделі тертя і поверхневого руйнування були розроблені для високоеластичних полімерів [2,26].

Вперше припущення про молекулярно-кінетичну природу тертя високоеластичних полімерів (гуми, каучука і т.п.) зробив Шалламах. При терті ненаповненої гуми на основі натурального каучуку по склу в області малих навантажень (тиск $p = 1,2 \text{ кг/см}^2 = 118 \text{ кПа}$) були експериментально встановлені залежності сили тертя F від логарифма швидкості ковзання $\lg V$ від зворотної температури $1/T$. На підставі залежності $F=f(\lg V)$, Шалламах припустив, що V є експонентною функцією енергії активації процесу тертя U і тангенціальної сили, рівної протилежно направленої силі тертя F . При цьому для вказаних умов проведення експерименту було встановлене значення $U=18,3 \text{ ккал/моль} = 76,6 \text{ кдж/моль}$. На підставі отриманих результатів Шалламах припустив, що тертя високоеластичних полімерів є молекулярним активаційним процесом, аналогічним в'язкому тертю. Це припущення лягло в основу молекулярно-кінетичної теорії зовнішнього тертя високоеластичних полімерів [2,28,36].

Створення теорії передувала розробка моделі досліджуваного явища. Теоретична молекулярно-кінетична модель зовнішнього тертя полімерів, що знаходяться у високоеластичному стані, була розроблена Г.М.Бартенєвим. Отримані ним теоретичні (аналітичні) залежності F від V і T аналогічні експериментально встановленим залежностям Шалламаха і задовільно пояснили відомий у той час факт, що сила тертя F високоеластичних матеріалів зі збільшенням V зростає, а також суперечливі результати різних дослідників і сформулювали умови, при яких застосовані запропоновані ними формули. Пізніше, порівнюючи теоретично визначене рівняння залежності $F=f(\lg V)$ з емпірично встановленим Шалламахом аналогічним рівнянням, Г.М.Бартенєв

одержав залежність $F=f(V,T)$ у вигляді (1.1) [2,26,36]:

$$F = \frac{U}{\gamma} + \frac{k \times T}{\gamma} \lg \frac{V}{V_0} \quad (1.1)$$

де k — стала Больцмана;

V_0 — швидкість звуку в засклованній гумі (~ 1000 м/с);

$\gamma = \frac{\lambda}{2 \times n_k}$, λ — середня відстань між сусідніми положеннями рівноваги

ланцюга на твердій поверхні;

n_k — число ланцюгів, що знаходяться в контакті з поверхнею твердого тіла[2].

Рівняння (1.1) можна легко експериментально перевірити, а екстраполяція прямої $F(T)$ на вісь температур ($F=0$ при $T=T_0$) дозволяє визначити енергію активації (1.2):

$$U = kT_0 \ln \frac{V_0}{V} \quad (1.2)$$

При цьому U оцінювали виходячи з припущення, що сили зчеплення між гумою і твердим тілом мають ван-дер-ваальсову природу, тобто $[U \approx 10-20$ ккал/моль $= 41,9-83,7$ кдж/моль. Це дозволяє експериментально оцінювати адекватність і конструктивність моделі якісно (характер залежностей F від $\lg V$ і T) і кількісно (значення U). Отримані численні експериментальні дані підтверджують адекватність і конструктивність цієї моделі в широкому діапазоні навантажень (питомих тисків p) - від 4,90 кПа (0,05 кг/см²) до 294 МПа (3×10^3 кг/см²), докритичних швидкостей ковзання - від $1,67 \times 10^{-8}$ м/с (10^{-3} мм/хв) до 3×10^2 м/с (3 см/с), крім експериментальних даних Гроша, і в температурному інтервалі $\approx 248-368$ °К (-25°C — $+95^\circ\text{C}$). При цьому графічно визначені значення $U = 50,2 - 134,8$ кдж/моль (12-32,2 ккал/моль) з урахуванням встановлених залежностей U від p , T , E : (рівноважний модуль гуми, ϵ показником густоти просторової сітки гуми), типу твердої поверхні контртіла і типу полімеру (полярність каучуку, морозостійкість, міжмолекулярну взаємодію в полімері), задовільно узгоджуються зі значеннями U об'ємного руйнування полімерів. Але графічно

встановлені значення U застосовують тільки для порівняльних досліджень, а залежності U від p (при $p = 0,05-3,0$ кг/см²; $U = 21,0 - 17,0$ ккал/моль), T (при $p = 20 - 100^\circ\text{C}$; $U = 20,8-18,8$ ккал/моль), E_* (при $E_* = 3,4-31$ кг/см²; $U = 17,1-19,9$ ккал/моль), типу твердої поверхні контртіла (при терті однієї і тієї ж гуми по сталі $U = 18,5$; по склу - $21,0$; по ебоніту - $24,5$ ккал/моль) і, особливо, від типу полімеру (для тертя гум з різних каучуків по сталі U дорівнює: СКС - $10-22,3$; СКС-30 - $27,2$; СКН-18 - $23,8$; СК-26 - $27,9$; СК-40 - $32,2$ ккал/моль), не дозволяють використовувати U як критерій оцінки зносостійкості полімерів через відсутність інваріантності U у першу чергу для порівняльних дослідів [2, 7, 12, 14, 35].

В області високих температур ($T > 368$ °К) спостерігається аномальна поведінка залежності $F(T)$ — при підвищенні T , F не зменшується відповідно до молекулярно-кінетичної моделі, а різко збільшується. Спочатку це пояснювали збільшенням площі фактичного контакту S_ϕ , пізніше, при дослідженні цієї залежності у вакуумі за допомогою вакуумного трибометра і спеціальних дрових тензодатчиків опори було показано, що різке збільшення F викликане окислювальними процесами на межі контакту полімер-тверде тіло. При температурах нижче критичної ($T < T_{KP} \approx 248$ °К полімерні ланцюги поведуться як тверді утворення, реалізується механізм тертя характерний для твердих тіл який неможливо пояснити, використовуючи молекулярно-кінетичну модель Г.М.Бартенєва. Збільшення $V > 1,67 \times 10^{-4}$ м/с (1 см/хв) ($V > 3$ см/хв) порушує лінійність залежності F від $\lg V$. Це пояснюється додаванням до F , визначеної за рівнянням (1.1) складової, залежної від механізму втрат у самій гумі і обліком не тільки часу осідлого життя τ_1 ланцюга полімеру на твердій поверхні, але і часу τ_2 , який необхідний для переходу (самодифузії) ланцюга з одного місця контакту в інше, тобто загальний час циклу осідлого життя і переходу ланцюга в нове положення $\tau = \tau_1 + \tau_2$ [2, 11, 12, 35].

Таким чином, молекулярно-кінетична модель тертя не пояснює фрикційні властивості полімерів в області низьких температур ($T < T_{KP}$) і залежність $F(V)$ з

максимумом, тобто ця модель вірна в області великої рухливості молекулярних ланцюгів, коли виконується одне з основних припущень — площа молекулярного контакту або число кінетичних одиниць n_k було постійним. Крім цього, модель не можна застосовувати під час тертя по шорстким твердим поверхням, а також не враховує хімічні процеси між полімером і підложкою [2, 12, 35].

Однак при підвищенні V або зменшенні T , особливо в області максимуму F , $n_k \neq \text{const}$. У результаті релаксаційних процесів формування площі контакту не забезпечує повного, максимального контакту полімерних ланцюгів з твердою поверхнею тертя. У загальному випадку, необхідно знати залежність числа молекулярних ланцюгів, що знаходяться в контакті з твердим тілом, від часу. Цей недолік усунула релаксаційна модель тертя полімерів, заснована на припущенні про те, що молекулярні ланцюги можуть знаходитися в двох станах (перше — мати контакт із твердою поверхнею, і друге — не мати) і можуть переходити з першого стану в друге і навпаки. Це припущення не суперечить основним положенням молекулярно-кінетичної моделі Г.М.Бартенєва, доповнює і розвиває її. Тому, виходячи з загальних імовірних уявлень, було отримане рівняння залежності $F(V)$, що співпадає з аналогічним рівнянням моделі Г.М. Бартенєва і підтверджується експериментальними даними, як і друга теоретична залежність $F(T)$. Крім цього, релаксаційна модель дозволяє передбачити вплив p , T , E , полярності полімерів, типу твердої поверхні на $F(V)$ і $F(T)$, а також вплив V на $F(T)$, що підтвердили експериментальні дані. Використовуючи принцип температурно-тимчасової суперпозиції, про застосовування якого до тертя полімерів було вказано раніше, за допомогою релаксаційної моделі встановили зв'язок між V , що відповідає максимуму $F-V_{max}$, і T , відповідно до якої для зміни V_{max} на порядок необхідно змінити температуру на ΔT . Теоретично обчислені значення $\Delta T = 292-299$ °K (19-26°C), експериментальні — $\Delta T = 293-303$ °K (20-30°C) [2, 17, 35].

У такий спосіб релаксаційна модель пояснює основні експериментальні дані, у тому числі, несиметричність залежностей $F(V)$ і $F(T)$, максимум у залежності $F(V)$, роль релаксаційного спектра полімерів, поєднує основні

залежності в області тертя полімерів і дозволяє передбачати ряд нових ефектів, тобто є узагальненням і подальшим розвитком молекулярно-кінетичної моделі. Разом з цим, релаксаційна модель не враховує нові процеси, що виникають при великих V — руйнування поверхні, температурні ефекти і т.п. Молекулярно-кінетична і релаксаційні моделі склали основу молекулярно-кінетичної теорії зовнішнього тертя полімерів [2, 17].

Більш складне, чим зовнішнє тертя, явище — зношування (поверхневе руйнування), що представляє собою сукупність фізико-хімічних процесів, що протікають на поверхнях тертя й у граничних шарах контактуємих матеріалів під впливом зовнішніх механічних впливів і навколишнього середовища [2, 15].

Тому кінетична модель поверхневого руйнування (зношування) полімерів (поліетилен високого тиску, пластифіковані полівінілхлорид і поліметилметакрилат), яка заснована на флуктуаційній теорії міцності матеріалів, що представляє зношування як термоактиваційний кінетичний процес, була розроблена не зовсім коректно, що викликало ряд справедливих зауважень і заперечень. Крім того, графічне визначення енергії активації зв'язків, що руйнуються, $U_0=54,4-234,5$ кДж/моль (13-56 ккал/моль), значення якої близькі до величин енергії активації при термоокислювальній деструкції полімерів $U=104,7-221,9$ кДж/моль (25-53 ккал/моль) або при простому, статичному одновісьовому розриві $U=104,7-234,5$ кДж/моль (25-56 ккал/моль) і встановлена залежність $U=f(p)$, обумовлена відсутністю структурної пристосованості під час тертя (СП) полімерів, не дозволяють використовувати U_0 як інваріантний критерій оцінки зносостійкості. Значне і необґрунтоване спрощення моделі не дозволило установити інші кінетичні параметри зношування полімерів — порядок і константу швидкості цього процесу [2, 26].

Більш докладна модель тертя, до того ж, металевих твердих тіл, без змазки (окислювальне зношування), розроблена О.К. Дєдковим, дозволяє глибше зрозуміти фізику цього процесу, повніше виявити фактори, що впливають на тертя і зношування, простежити їхню взаємодію і взаємовплив. Ґрунтуючись на положеннях фізики твердого тіла, газодинаміки і хімічної кінетики, були отримані

диференціальні рівняння, які зв'язують концентрацію окислювача в просторі контактного зазору з іншими факторами, що визначають процес взаємодії газового середовища і поверхонь тертя твердих тіл (константами швидкості хімічної реакції окислювання поверхонь пари тертя, показником ступеня швидкості окислювання, коефіцієнтом дифузії окислювача, висотою контактного зазору, швидкості відносного ковзання, відносної площі контакту й ін.). Це дозволило оцінити всі кінетичні параметри окислювального зношування, у тому числі, енергію активації цього процесу. При цьому оцінка константи швидкості хімічної реакції окислювання третьових поверхонь k можлива, коли обидва елементи пари тертя виготовлені з однакового матеріалу. Аналогічно роботі С.В. Ратнера, Є.Г. Лур'є. була визначена залежність енергії активації окислювального зношування E_{oi} від p , а також $E_{oi}=f(T)$, що обумовлені відсутністю діапазоні СП металів при терті без змазки. Ці залежності не дозволяють застосовувати E_{oi} як критерій оцінки зносостійкості металів через не постійність значень [9, 26].

Оцінку енергії активації хімічного модифікування поверхонь тертя E_{xm} в умовах граничної вуглеводневої змазки вперше в трибології здійснили в роботі [7]. Припускаючи, що швидкість реакції V_{xm} зворотно пропорційна зміні коефіцієнта тертя Δf_{mp} та, аналогічно роботі [26], побудували графік залежності $\lg \frac{1}{\Delta f_{TP}} = f\left(\frac{1}{T}\right)$ за тангенсом кута нахилу прямої до вісі абсцис, автори розраховували значення E_{xm} , як справедливо зазначено, у відносних одиницях. Пояснюючи більш високе значення критичної температури $T_{кр}$, встановлене експериментально для дифенілдисульфіда, що обумовлено підвищеною адсорбційною здатністю, автори показали відсутність зв'язку хімічного модифікування з попереднім (адсорбція) і наступним (зношування) процесами, тобто спрощений характер запропонованої моделі оцінки E_{xm} . По цій же причині автори пояснюють зв'язок E_{xm} зі зношуванням присутністю з'єднань про високу релаксаційну здатність та хімічним зношуванням, що спостерігається. У дійсності це пояснюється залежністю зношування (поверхневого руйнування) від хімічного

модифікування, тому що останній процес є передуючим стосовно зношування, а також фізичною сутністю енергії активації нового фізичного або хімічного процесу. Як справеливо вказано, застосування енергії активації як критерія оцінки експлуатаційних властивостей присадок до масел найбільше доцільно при дослідженні з'єднань, близьких по будівлі і структурі. Це свідчить про високу здатність цього критерію, що дозволяє. Спрощена модель не дозволила оцінити інші кінетичні параметри — порядок реакції N і константу швидкості K досліджуваного процесу [7, 26].

На відміну від спрощених трибологічних моделей застосування більш складної двухстадійної моделі тертя без змазки дозволило розрахувати значення констант швидкостей (K^m і K^s) і енергій активації (E_f і E_d) обох стадій — утворення, модифікування (m) і руйнування (S) модифікованих (вторичних) структур. Незважаючи на наближені значення температури, що у ході випробувань не вимірювали, і розрахунок K^m , K^s , E_f і E_d за даними мікрофрактографічної оцінки площі і товщини модифікованих структур, розраховані значення E_d досить добре збігаються з отриманими в приблизно таких умовах значеннями E_{ou} [9, 33, 34].

Ще одна двухстадійна модель зношування, але для більш складного випадку — граничної змазки, представлена в роботі Й.Я. Подольського, І.Г. Цуркана, І.В. Корєпова, І.В. Самусенко. Спеціальними дослідженнями автори показали, що зношування в цих умовах реалізується насамперед за рахунок руйнування тих шарів, що утворюються на поверхні металу під час тертя. Але основну задачу своєї, в цілому адекватної двухстадійної моделі автори сформулювали як визначення констант швидкостей руйнування поверхневих шарів і їхньої регенерації (утворення), що обумовило відсутність інформації про такі важливі кінетичні характеристики як порядок і енергія активації цих процесів. До того ж, оцінка константи що характеризує протизадирну активність присадки вимагає додаткової інформації з складу продуктів, що утворюються при терті, і концентрації розчиненого в маслі кисню, що значно знижує конструктивність цієї моделі [25].

Заміна констант швидкостей реакції K в рівнянні Аррениуса на значення роботи виходу електрона (PBE) металів при їхній взаємодії з нагрітим мастильним матеріалом дозволила установити енергію активації (E) утворення граничного мастильного шару і побудувати графіки залежностей $\Delta PBE=f(T)$ і $E=f(T)$, що дозволили оцінити і прогнозувати властивості мастильних матеріалів для теплонавантажених двигунів. Як стверджують автори, отримані результати добре корелюють з даними дослідів на машинах тертя, корозійних і експлуатаційних дослідів. На жаль, автори фізично не обґрунтували правомірність такої заміни K на ΔPBE . Відсутні значення інших кінетичних характеристик - порядку і константи швидкості реакції [19].

І.О. Буяновский запропонував формули для розрахунку інтенсивності адгезійного і корозійно-механічного зношування у режимі граничної змазки. При цьому розрахунок інтенсивності адгезійного зношування проводили за значеннями енергії активації руйнування в результаті термічного впливу E_T і структурно-механічного коефіцієнта, що показує напрямок і ефективність дії механічного поля γ встановлених у процесі експериментальної оцінки критичної температури $T_{кр}$, що створює додаткових труднощів. Оцінку енергії активації хімічної взаємодії Q для розрахунку інтенсивності корозійно-механічного зношування здійснювали графічно, тобто у відносних одиницях. До того ж, проведені експерименти показали, що не завжди вдається в лабораторних умовах установити температуру хімічної модифікації $T_{хм}$ температурним методом при різних швидкостях ковзання, що перешкоджає оцінці Q графічним способом. Це змушує використовувати метод непрямой оцінки Q і порівняльну характеристику протизносних властивостей мастильних матеріалів [7].

Створення кінетичної моделі тристадійної трибореакції (І) значно збільшило конструктивність застосування кінетичного підходу в вирішенні трибологічних задач. Універсальність і великі можливості вказаної моделі надалі використані й в інших роботах. Так, наприклад, додавши до трьох стадій трибореакції (І) ще одну стадію — розкладання (P) молекул реагенту в силовому полі твердого тіла під дією температури тертя, автори розраховували деякі

енергетичні характеристики тертя й установили взаємозв'язок між інтенсивністю зношування і контактним тиском за допомогою критерію $(Q_p + Q_m + 2E)/2RT$, тобто сумарної енергії активації стадій розкладання Q_p і модифікування Q_m (E -теплота адсорбції, R - універсальна газова постійна). Однак, це збільшення стадій привело до кількісного збільшення припущень, спрощень і припущень (10 замість 3 у роботі). До того ж, суму енергій активації $Q_p + Q_m$ розраховували графічно, за тангенсом кута нахилу прямої до вісі $O \ 1/T$ (OX), тобто в умовних одиницях, аналогічно [7, 26] роботам. Не визначили інші кінетичні параметри — N і K незважаючи на те, що константи швидкостей усіх стадій широко представлені в розрахункових формулах [7, 26].

Припустивши, що основні принципи кінетичної теорії міцності твердих тіл і принципи термофлуктуаційного механізму руйнування можуть бути використані при вивченні кавітаційно-ерозійного зношування (КЕЗ), замінивши довговічність K в формулі С.Н. Журкова на число зіткнень зі струменем протягом інкубаційного періоду N , О.І.Некоз побудув графіки залежностей $\lg N$ від швидкості зіткнень зразків зі струменем V і $1/T$. Лінійні залежності підтвердили припущення про термофлуктуаційний механізм руйнування при КЕЗ. Приведені значення енергії активації руйнування при КЕЗ (U) отримані графічно, тобто аналогічно роботі С.В. Ратнера, Є.Г. Лур'є, у відносних одиницях. Очевидно, залежність $U=f(V)$ обумовлена відсутністю діапазону СП при КЕЗ. Аналогічно роботі С.В. Ратнера, Є.Г. Лур'є інші кінетичні параметри (N, K) відсутні [22,26].

На основі стохастичного аналізу фрикційної взаємодії трибосистеми й основних рівнянь хімічної кінетики запропонований метод оцінки енергії активації процесу плівкового голодування. Але сумарну енергію активації цього процесу знову оцінюють тангенсом кута нахилу прямої в координатах $\lg l - 1/T$ де S і l - відстань між ділянками фактичного контакту і їхньою довжиною в напрямку ковзання, тобто аналогічно роботам І.О. Буяновського, С.В. Ратнера, Е.Г. Лур'є графічно, у відносних одиницях. Інші кінетичні параметри (N, K) відсутні [7, 26].

Розгляд трибохімічних реакцій з позицій хімічної кінетики дозволило одержати рівняння, яке зв'язують основні параметри тріади тертя (об'єм масла,

площа контакту, коефіцієнт тертя, нормальне навантаження, швидкість ковзання, температура) і ресурс мастильного матеріалу, а також виявити складну залежність останнього від енергії, яка виділяється при терті, і встановити, що підвищення цієї енергії понад визначену величину приводить до стрибкоподібного збільшення уявної енергії активації трибохімічної реакції. Вказано, що ці реакції для мінеральних і жиркових масел має перший порядок ($N=1$), а силіксанові — більш першого ($N>1$), що підтверджують раніше отримані результати. На жаль, автор не вказав методику оцінки та чисельні значення енергії активації інших кінетичних параметрів, крім порядку реакції [18].

Вивчаючи вплив температури на ресурс мастильних матеріалів і розглядаючи трибохімічні реакції як термоактивуємий процес по початковій ділянці температурної кривої була розрахована енергія активації трибохімічних реакцій, тобто очевидно, графічно, аналогічно роботам І.О. Буяновського, О.І. Некоза. Дані оцінки інших кінетичних параметрів відсутні [3, 7, 22].

Особлива увага приділяється використанню формальної (хімічної) кінетики для опису змащувальної дії і мастильних матеріалів. Так, наприклад, використовуючи аналітичну модель, основу на застосуванні температурного методу оцінки мастильних властивостей масел І.О. Буяновський, одержав залежність інтенсивності зношування I від енергії активації утворення модифікованих шарів E_p і різниці хімічних потенціалів активних молекул в адсорбційному і розчиненому станах $\Delta\mu$. Це дозволило оцінити протизносні властивості мастильних матеріалів як з відомими хімічними активними присадками, так і з новими, антифрикційними, для яких умовна енергія активації $(E_p - \Delta\mu)$ характеризує антифрикційну дію. При цьому оцінка $(E_p - \Delta\mu)$ здійснювалася графічно, тобто в умовних одиницях. Не були оцінені константи швидкостей і порядки реакцій вказаних процесів. До того ж представлену модель застосовують тільки для мастильних матеріалів із присадкою (реагентом) [7].

Наближений метод оцінки порядку трибохімічного процесу N за аналізом температурної залежності коефіцієнта тертя в інтервалі температур реалізації хімічного модифікування розроблений І.О. Буяновським. Але значення N

оцінювалися графічно, в умовних одиницях, що значно зменшило конструктивність цього методу [7].

В наш час В.Г. Мельников продовжує досліджувати вплив параметрів тертя (контактного напруження та швидкісного фактора) на енергію активації процесу трибохімічного спрацювання мастильних матеріалів в зоні тертя кочення. Вихідними даними для розрахунку енергії активації він використовував результати дослідів з граничної працездатності матеріалів у вакуумі та в атмосфері повітря на п'ятишариковій машині тертя. Розрахунок енергії активації В.Г. Мельников проводив за кінетичною модел'ю, принцип побудови якої наведений далі. Процес трибоперетворень мастильних матеріалів складається з цілого ряду послідовних та паралельних хімічних та фізичних процесів (окислення, випаровування, механокрекинг, крекинг, полімеризації, розтікання, викидів з зони тертя та ін.) кожний з яких характеризується своєю окремою енергією активації та температурним діапазоном протікання. Тому стосовно процесу трибоперетворень мастильних матеріалів може йти мова тільки про сумарну енергію активації. Слід відмітити, що енергія активації, яку розраховують за рівнянням Арреніуса:

$$1/\tau = A \exp(-E/RT) \quad (1.3)$$

є уявною, оскільки включає себе також теплоти адсорбції і хімічної взаємодії мастильних матеріалів з матеріалом тіл та доріжок кочення. Фізичний зміст величини A розкривається при $T \rightarrow \infty$, звідки

$$A = \ln(1/\tau) \quad (1.4)$$

тобто A не залежить від T і є постійною величиною, що виглядає сумнівно. У процесі побудови моделі виявили кореляції сумарної енергії активації процесу спрацювання мастильних матеріалів з параметрами тертя, виходячи з незалежності у першому наближенні енергії активації від температури.

Теоретичною основою використання кореляційного аналізу для вивчення взаємозв'язку „параметри тертя—сумарна енергія активації мастильних матеріалів” є принцип лінійності вільних енергій. Згідно останьому вклади, що

вносяться до сумарної енергії активації різними факторами, у першому наближенні не залежать один від одного, а величина сумарної енергії активації складається адитивно з окремих елементів.

Аналізуючі процес побудови моделі В.Г. Мельниковим були виявлені такі недоліки:

- процес побудови кінетичної моделі ґрунтується на гіпотезах та припущеннях, які не мають реальних підтверджень;
- не конкретизується кількість стадій, які має запропонована модель.

Не дивлячись на перераховані недоліки, отримані деякі експериментальні данні (таблиця 1.1) корелюють зі значеннями енергії активації зносу

Таблиця 1.1 - Результати розрахунків сумарних енергій активації рідких мастильних матеріалів при різних параметрах тертя у повітрі/вакуумі.

| T, K | $t, \text{хв}$ | $d_n, 10^3 \text{ мм} \times \text{хв}^{-1}$ | $\sigma, \text{ГПа}$ | $E, \text{кДж/моль}$ | A |
|--|----------------|--|----------------------|----------------------|------------|
| Поліметилсилоксанова рідина ПМС-50ВВ | | | | | |
| 473 | 5/7 | 72 | 1,95 | 10,5/7,4 | 1,07/-0,07 |
| | 20/15 | 36 | 1,95 | 16,0/10,4 | |
| | 50/35 | 18 | 1,95 | 19,6/13,7 | |
| | 7/5 | 36 | 2,50 | 11,9/6,1 | |
| | 40/45 | 36 | 1,55 | 18,7/14,7 | |
| | 90/160 | 36 | 1,25 | 21,9/19,7 | |
| 423 | 10/6 | 36 | 2,50 | 115/6,1 | |
| Поліметилдихлорфенілсилоксанова рідина ХС-2-1 ВВ | | | | | |
| 473 | 10/10 | 72 | 1,95 | 15,4/13,5 | 1,61/1,13 |
| | 45/30 | 36 | 1,95 | 21,3/17,8 | |
| | 90/40 | 18 | 1,95 | 24,0/18,9 | |
| | 15/10 | 36 | 2,50 | 17,0/13,5 | |
| | 80/80 | 36 | 1,55 | 23,6/21,7 | |
| | 120/2500 | 36 | 1,25 | 25,2/35,2 | |
| 423 | 25/15 | 36 | 2,50 | 17,0/13,5 | |

(поверхневого руйнування) отриманими О.І. Богдановичем та отриманими в даній роботі [5, 20].

В.П. Тихомиров О.А. Говреленко запропонували модель яка дозволяє оцінити залежність коефіцієнта тертя від швидкості ковзання. В основу моделі покладено уявлення про активаційний центр як просторово-часове утворення на поверхні тертя. Припускається, що опір відносному зсуву залежить від взаємодії активних центрів, розташованих на поверхні елементів пари тертя [27].

1.2 Критерії оцінки зносостійкості матеріалів трибоспрямижень

Як відомо, зносостійкість є властивістю матеріалу чинити опір зношуванню у визначених умовах тертя. Оцінюється величиною, зворотної швидкості зношування або інтенсивності. Швидкість зношування (темп зносу) оцінюється як відношення зносу до часу, протягом якого він утворився, або до числа одиничних актів зношування. Інтенсивність зношування - відношення зносу до шляху, на якому відбулося зношування. Тобто, в обох випадках для оцінки зносостійкості необхідно знати величину зносу. Знос — результат зношування у встановлених одиницях (довжини, об'єма, маси й ін.) (ГОСТ 23.204-78), який виявляється у вигляді відділення або залишкової деформації матеріалу [30].

У зв'язку з цим вибір одиниць зносу обумовлений конструкцією машини тертя, точніше, схемою контакту і методикою проведення випробувань, у першу чергу, методикою обробки результатів. В даний час стандартизовані дві методики і машини тертя (ГОСТ 9490-75 і ДСТУ 23.221-84) з однаковою схемою контакту - чотири шарики. Цього недостатньо для рішення постійно зростаючих потреб трибології, хімотології, матеріалознавства, потреб машинобудування, експлуатації машин і механізмів у всіх галузях народного господарства. До того ж, чотирьохшариковим машинам (ЧШМ, МАСТ-1 і МАСТ-2) притаманні істотні недоліки, які значно обмежують їхнє практичне використання:

1. Показник P_c (навантаження зварювання) характеризує деякі властивості мастильних матеріалів, специфічні для умов, які лежать за межами фактично спостерігаємих в експлуатації.

2. Показник P_c , мало доповнює оцінку якості мастильних матеріалів по узагальненому показнику зносу, а його величина для широко застосовуваних мастильних матеріалів практично змінюється в дуже незначних межах.

3. Метод оцінки міцності плівки за P_k (навантаження заїдання) розрізняє мастильні матеріали без присадок між собою не більш ніж у два рази (з присадками у 5 разів), тоді як в експлуатації їхня поведінка істотно відмінна.

4. Це посилюється низькою точністю оцінки P_k .

5. Малі величини об'ємного зносу (не більше 0,03 мм) обмежують використання ЧШМ для диференціації мало чим відмінних одна від одної за протизносною ефективністю присадок, які забезпечують достатньо низький рівень зносів у нормальних умовах.

6. Велика тривалість випробувань по оцінці протизадирних властивостей мастильних матеріалів з присадками і без них [16].

Це призвело до переваги методик, машин тертя і критеріїв оцінки зносостійкості матеріалів, які вирішують поодинокі, конкретні питання. До таких критеріїв відносять:

- 1) інтенсивність випромінювання радіоактивних ізотопів [14].
- 2) площа нещільності двох поверхонь [31].
- 3) зменшення (різниця) тиску робочого середовища [31].
- 4) площа, товщина, час життя вторичних структур [15].

Переваги і недоліки кожного з цих критеріїв відомі, але широкого застосування в триботехніці (практичній трибології) вони не знайшли. Мабуть, недоліки кожного з цих критеріїв виявилися вагомніше переваг. Існує принципова можливість перерахування наведених критеріїв оцінки зносу в один, найбільш розповсюджений критерій — лінійний знос. Але такий розрахунок — дуже наближений через нерівномірний розподіл зносу по поверхні тертя і неможливого точного визначення закономірності цього розподілу.

Найбільш суттєво те, що всі відомі критерії залежать від параметрів навантаження (навантаження P або тиску p на зразки і швидкості ковзання V_k), температури T и тривалості t , при яких проводять випробовування. Таким чином,

жоден з перелічених критеріїв оцінки зносу не є інваріантними, навіть у якому-небудь інтервалі значень P , V_k , T , що не дозволяє використовувати їх як уніфіковані константи й ефективно застосовувати для створення банку даних. Крім того, неінваріантність вказаних критеріїв створює значні труднощі для обґрунтованого вибору параметрів навантаження P , V_k , T для проведення порівняльних випробувань конструкційних і мастильних матеріалів, не дозволяє встановити оптимальні області застосування відомих матеріалів і створювати нові, з наперед прогнозованими властивостями. Проведення випробувань при будь-яких сполученнях P , V_k , T практично нереалізовані [5].

У структурно-енергетичній теорії тертя і зношування і теорії структурного пристосування, застосовують нові, енергетичні і ентропійні критерії оцінки зносостійкості. У першу чергу питома робота руйнування A_P , енергоємність системи тертя за тепловим показником ECT_Q , критична величина роботи тертя A_{KP} , кінетична S^K і потенційна (конфігураційна) S^n ентропії, які складають загальну ентропію S , ентропійний критерій деградації EKD . Досить широке використання одержали і такі енергетичні критерії як критична (гранична) щільність внутрішньої енергії U_* (для абразивного зношування), поверхнева енергія або поверхневий нагяг γ , робота виходу електрона PBE , екзоелектронна емісія EEE , контактна різниця потенціалів U_{KPI} , а також ентропійний критерій мінімуму виробництва ентропії. При цьому енергетичні і ентропійні критерії оцінки зносостійкості характеризують процеси поверхневого руйнування, обґрунтовно оцінюють умови тертя, вибір матеріалів трибоспрямижень, їх сполучення в межах нормального зношування (без пошкоджень), визначають межі переходу до пошкоджень [4, 6, 15].

Вказані критерії не є прямими характеристиками зносостійкості матеріалів. Так, найбільш розповсюджений, найкраще вивчений і експериментально перевірений критерій — питома робота руйнування (відношення роботи сил тертя до величини зносу) є уявною характеристикою зносостійкості і залежить не тільки від поверхневої міцності матеріалу, але і від здатності трибосистеми розсіювати енергію. Застосування поверхневої енергії γ незручне через

відсутність надійних даних про величини γ чистих металів, не говорячи про сплави в реальних умовах [6].

Найбільш повним і прямим критерієм абразивного зношування є U . Однак його застосування для нормального зношування обмежується залежністю складу вторичних структур, які обумовлюють зносостійкість матеріалів, від умов припрацювання, навантаження, складу мастильного матеріалу. Таким чином, стосовно до поставленої задачі, використання відомих енергетичних та ентропійних критеріїв оцінки зносостійкості в якості інваріантних обмежується суттєвими недоліками кожного з них.

Найбільш прямою, кількісною, структурно-енергетичною (матеріалознавською), кінетичною (фізико-хімічною) характеристикою корисною для оцінки зносостійкості матеріалів трибоспрямижень є енергія активації поверхневого руйнування E , яка характеризує потенційний бар'єр реалізації елементарних актів руйнування. При цьому в діапазоні структурної пристосованості (СП) матеріалів E повинна бути інваріантною величиною, яку можливо застосовувати і у якості критерія оцінки протизносних властивостей мастильних матеріалів. Це, на відміну від існуючого різноманіття критеріїв оцінки зносостійкості, яке регламентоване ГОСТ 27674-88 і ГОСТ 9490-75, дозволяє використовувати E в якості універсального, єдиного критерію оцінки трибологічних властивостей матеріалів трибоспрямижень. Однак застосування E обмежено необхідністю виконання наступних умов:

- 1) знання, хоча б загальних рис, механізму (стадійності) досліджуваного процесу;
- 2) доказ граничних умов інваріантності E ;
- 3) оптимальний ступінь простоти застосованого механізму процесу (узагальненої трибореакції) [5].

Універсальність E підтверджується її застосуванням як критерія оцінки різних фізичних процесів. Так, наприклад, відоме використання енергії активації U , як функції опору деформування σ пластично деформованого металевго зразка. При цьому U , яка описує процеси перебудови атомів у кристалічних

гратках, визначається ступенем порушення порядку, викликаного деформацією. Незважаючи на добрий збіг значень U з енергією активації дифузії й самодифузії, а також підтвердження рівності

$$U = 20 \times R \times T_{пл} \quad (1.5)$$

де $T_{пл}$, — температура плавлення, цей висновок не вселяє особливої довіри через низьку точність оцінки ступеня порушення порядку кристалічної решітки[6].

Залежність кінетичних властивостей рідин, наприклад, часу релаксації τ , в'язкості η , питомого опору ρ та коефіцієнта дифузії D від T при постійному тиску, виражається формулами експонентного виду, для яких експонентний вираз має вигляд:

$$U/R \times T \quad (1.6)$$

де U — енергії активації кінетичних процесів;

R — стала Клапейрона.

Характер зміни швидкості ковзання V пов'язують зі зміною ступеня міжмолекулярної взаємодії. При цьому вірна оцінка величини U , виходячи з енергії міжмолекулярних зв'язків, кристалічних і склоподібних тіл повинна сприяти подальшому розумінню складної закономірності в залежності кінетичних властивостей від зовнішніх умов у рідин.

Величиною енергії активації та її залежністю від напруг, а іноді і від T , характеризують температурну залежність швидкості повзучості. При цьому значення енергії активації визначають тільки на прямолінійних ділянках кривих $\ln \varepsilon = f(1/T)$ (ε_0 — початкова швидкість повзучості). Визначена в такий спосіб U сильно залежить від напруг, що не дозволяє використовувати її у якості критерію оцінки повзучості [23].

Енергія активації молекулярних перегруповань полімерів — важлива фізична величина, пов'язана з будовою речовини і визначає релаксаційні процеси і процеси осклятивання в полімерах. У результаті систематичного вивчення структурного розм'якшення і осклятивання низько- і високомолекулярних стеклов було встановлено, що енергія активації різних аморфних речовин прямо

пропорційна температурі структурного осклятивання T_c^{CT} , а у склоподібному стані лінійно зменшується з підвищенням температури:

$$U = U_0 - \alpha T \quad (1.7)$$

де U — екстраполяційне значення енергії активації при абсолютному нулі, залежить від природи аморфної речовини, і його структури в склоподібному стані;

α — константа.

Енергія активації механічного осклятивання полімерів, при якому спостерігається перехід з високоеластичного в пружний стан, теж прямо пропорційна температурі механічного осклятивання T_c^M , полімеру і більше енергії активації структурного осклятивання приблизно на 5-10%. Тому швидкість встановлення рівноважної структури більше швидкості релаксації напруги або швидкості розвитку високоеластичної деформації. При цьому значення U структурного і механічного осклятивання розраховувалися за досить простими формулами:

$$U = aT_c \quad (1.8)$$

де $a \cong 64$ ккал/моль \times град ($268,0 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \times \text{град}}$), і складають: для каучуків $U_0=3508-94,0$ ккал/моль ($149,9-393,6$ кДж/моль), $U^{CT}=13,0-16,9$ ккал/моль ($54,43-70,76$ кДж/моль), $U^M=14,1-17,7$ ккал/моль ($59,03-74,11$ кДж/моль), для скла $U_0=106-170$ ккал/моль ($443,8-711,8$ кДж/моль), що добре узгоджується зі значеннями енергії активації, встановленими іншими дослідниками. Використання U_0 і тим більше U^{CT} і U^M як критеріїв оцінки аморфних речовин не є можливим через залежність U_0 від структури аморфної речовини в склоподібному стані [2].

Під час вивчення термічного розкладу (термодеструкції) поліетилену методом мас-спектрометрії за значеннями енергії активації цього процесу було виявлено наявність двох стадій: перша стадія характеризується порівняно низькою енергією активації $E_1=25$ ккал/моль ($104,7$ кДж/моль), друга — більш вищою — $E_2=70$ ккал/моль ($293,1$ кДж/моль). Тоді як енергія активації

механічного руйнування поліетилену U_0 , визначена графічно за температурно-тимчасовою залежністю міцності, приблизно дорівнює 25 ккал/моль (104,7 кдж/моль). Зіставляючи E_1 і U_0 для поліетилену й аналогічні дані для полістиролу і поліметилметакрилату, був зроблений висновок про тісний зв'язок між процесами термічної і механічної деструкції, про те, що в основі обох процесів лежать однакові елементарні акти термофлуктуаційного розпаду хімічних зв'язків у макромолекулах. Кореляція між E_1 і U_0 обумовлена наявністю слабких зв'язків у полімерах, які впливають на механічні властивості полімерів. Видалення слабких зв'язків приводить до зміцнення полімерів і до збільшення енергії активації механічного руйнування від $U_0=E_1$ до $U_0=E_2$ [2].

Однак при зіставленні значень енергій активації отриманих різними дослідниками, навіть того ж самого процесу, необхідно враховувати методику оцінки цих значень, а при графічній оцінці - масштаб системи координат. До того ж, дані графічної оцінки енергії активації можна використовувати тільки під час порівняльних випробуваннях. Наприклад, при графічній оцінці енергії активації руйнування трьох матеріалів (алюміній, мідь, цинк) крутінням отримали такі результати: 27 (112,0), 28 (117,2) і 13,5 ккал/моль (56,52 кдж/моль) відповідно. Аналогічна оцінка енергії активації засновником кінетичної теорії міцності С.Н. Журковим привела до даних, аналогічним енергії активації руйнування розтягуванням, тобто 51 ккал/моль (213,5 кдж/моль) для алюмінію та 25 ккал/моль (104,7 кдж/моль) для цинку [2].

Розходження значень енергії активації взаємозалежних і взаємообумовлених процесів вказує на різний фізичний зміст цих процесів і великі можливості в застосуванні значень енергії активації як критеріїв оцінки взаємозалежних, взаємообумовлених, послідовних процесів. Так, наприклад, значення енергії активації росту зародкових тріщин шляхом приєднання до них вакансій кристалічної решітки до критичного розміру, при якому починається „лавиноподібний” ріст тріщин, який приводять до крихкого руйнування, для Cu, Fe, Ni, Mo складають 47-97 ккал/моль (196,8-406,2 кдж/моль), що відповідає значенням енергії активації самодифузії, за винятком енергії активації

самодифузії W . Тоді як, значення енергії активації, наступного за ростом тріщин процесу руйнування для цих же металів, складає 81-170 ккал/моль (339,1-711,8 кдж/моль), що відповідає значенням енергії активації процесу сублімації, тобто енергії зв'язку кристалічних решіток [2].

Висновки до розділу 1

На підставі проведеного аналізу фізико-хімічні (кінетичні) моделі поверхневого руйнування матеріалів трібоспряжених і існуючих критеріїв оцінки зносостійкості матеріалів трібоспряжених встановлено, що найбільш наближений метод оцінки порядку трибохімічних процесу N з аналізу температурної залежності коефіцієнта тертя в інтервалі температур реалізації хімічного модифікування розроблений І.О. Буяновський. Але значення N оцінювалися графічно, в умовних одиницях, що значно зменшило конструктивність цього методу

2 МЕТОДИКА І ВИБІР ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Методичний підхід

Для проведення дослідження вибираю кінетичну модель О.І.Богдановича розробка методичного підходу якої складається з наступних етапів:

1. Аналітичне дослідження багатостадійної (тристадійної) кінетичної моделі нормального механо-хімічного зносу матеріалів трибоспряжень.

Для цього необхідно з багатьох виникаючих при терті процесів виділити кінетично визначальні, тобто істотно повільні процеси, що складуть основу кінетичної моделі. Стадіями кінетичної моделі можуть бути фізична і хімічна адсорбція, термо- і екзоелектронна емісія, дифузія, пластична деформація, модифікування, руйнування матеріалів трибоспряжень і інші механічні і фізико-хімічні процеси. Виділені стадії (підпроцеси) не є елементарними, однак вже при такій деталізації моделі її аналітичне описання стає надзвичайно складним. Разом з тим, можливість розрахунку кінетичних характеристик всіх стадій моделі дозволяє оцінювати взаємовплив і взаємообумовленість основних (найбільш повільних з кінетичної точки зору) стадій, а також прогнозувати вплив хімічних і поверхнево-активних речовин, з одного боку, і фізико-хімічних властивостей конструкційних матеріалів, з іншого боку, на кінцевий результат трибореакції, що значно збільшує конструктивність і інформативність обраної моделі. Тому, з огляду на можливості й обмеження двухстадійної моделі, представлені в роботах Й.Я.Подольского, І.Г.Цуркана, І.В.Корепова, І.В.Самусенко та роботі В.Аронова необхідно для вирішення поставлених задач кількість стадій у новій моделі повинно бути не менш трьох. При цьому необхідно враховувати черговість і взаємовплив стадій між собою. З огляду на різноманіття видів змазки і складність взаємозалежностей процесів, які виникають при зношуванні, доцільно використовувати кінетичну модель для одного, найбільш розповсюдженого і досить складного виду змазки, наприклад, граничного [5, 25, 33, 34].

2. Проведення якісної (теоретичної) і експериментальної оцінки адекватності і конструктивності розробленої кінетичної моделі, установлення її

основних характеристик і критеріїв оцінки зносостійкості матеріалів трибоспрямижень.

Оцінку адекватності і конструктивності будь-якої фізичної (фізико-хімічної) моделі здійснюють шляхом порівняння розрахункових і експериментальних даних, або, що набагато краще, шляхом прогнозування даних і експериментального підтвердження прогнозу. Але проведення дослідів — тривалий і трудомісткий процес, який вимагає значних матеріальних затрат. Тому для швидкої оцінки і, при необхідності, коректування моделі досить якісно підтвердити її вірність, тобто за допомогою моделі описати відомі експериментальні дані. Основні характеристики моделі — це параметри стадій (процесів), за допомогою яких визначають або розраховують основний (головний) критерій оцінки зносостійкості, який повинний бути інваріантним (постійним при заданій точності його оцінки в будь-якому діапазоні значень P , $V_{\text{шк}}$, T), структурно-енергетичним (матеріалознавським), кінетичним (фізико-хімічним) [5].

3. Перевірку експериментально-розрахункової методики оцінки кінетичних характеристик кінетичної моделі і критеріїв оцінки зносостійкості, експериментально оцінити адекватність, точність і конструктивність вказаної методики на прикладі практичного використання характеристик зносостійкості декількох конструкційних і мастильних матеріалів.

Розробка експериментально-розрахункової методики обумовлена необхідністю оцінки кінетичних характеристик моделі і вимогами, які висувають до критеріїв оцінки зносостійкості. При цьому для оцінки кожної характеристики необхідно враховувати особливості оцінки кількісних значень, за допомогою яких оцінюються або розраховуються критерії оцінки зносостійкості матеріалів трибоспрямижень. Експериментальну перевірку адекватності і конструктивності розробленої методики здійснювали в процесі і за результатами дослідів за оцінкою всіх характеристик моделі і, насамперед, характеристик, необхідних для розрахунку критеріїв оцінки зносостійкості. Конструктивність такої методики обумовлена її можливостями з обмеженнями, адекватність — статистичними

коефіцієнтами і параметрами, які розраховуються за експериментальними даними проведених досліджень. Збільшення кількості дослідів по оцінці конструктивності й адекватності розробленої методики обмежується матеріальними витратами і тривалістю їхнього проведення. Проводити такі досліді необхідно з найбільш розповсюдженими в триботехніці і реальних вузлах тертя конструкційними і мастильними матеріалами. Методика повинна мати потенційну можливість застосування для широкого класу відомих і знову створюваних матеріалів трибоспряжень [5].

4. Виявлення енергетико-активаційної природи загальної закономірності трибології — структурної пристосовуваності (СП) матеріалів під час тертя, використовуючи кінетичну модель, методику і характеристики зносостійкості матеріалів трибоспряжень, а також вивчити закономірності зміни вказаних характеристик з метою встановлення характерних закономірностей зміни діапазону або інваріантності їхніх значень.

Найбільш загальна закономірність трибології, яка підтверджується всіма накопиченими експериментальними даними в області експлуатації машин і обробки матеріалів інструментами міститься в тому, що для усіх відомих матеріалів існують діапазони навантажень (P) і швидкостей переміщення, у яких трибологічні показники стійкі і на декілька порядків нижче, чим поза вказаними діапазонами. Фізичним механізмом загальної закономірності є універсальне явище адаптації — структурного пристосування матеріалів під час тертя. Для підтвердження вказаної закономірності необхідно експериментально встановити значення P и $V_{шк}$ відповідні границям переходу від несталого тертя і зношування до стаціонарного (діапазон СП) і від стаціонарного — до пошкоджуваності, наприклад, схоплювання, і визначити значення критерію зносостійкості в кожному діапазоні. При чому в діапазоні СП визначаємо кілька значень критерію, для виявлення характерної закономірності зміни його значень [5,15].

2.2 Теоретичні передумови трибокінетичного описання

Тертя — це, насамперед, процес перетворення зовнішньої механічної

енергії в теплоту й енергію внутрішніх процесів, результат різних видів взаємодій, які реалізуються в механічних, фізико-хімічних, механо-хімічних теплових, електричних і інших взаємозалежних і взаємообумовлених процесах. При цьому усі відомі і можливі взаємозалежні і взаємообумовлені взаємодії і процеси залежать від часу, тобто тертя — кінетичний процес [14,15].

Застосування фундаментальних наук у трибології стало можливим завдяки розвитку теоретичної фізики (термодинаміки незворотніх процесів), матеріалознавства і кінетики. Особливо значні успіхи застосування кінетики, зокрема, формальної (хімічної) і термодинаміки незворотніх процесів (незворотньої термодинаміки), двох взаємозалежних, близьких за досліджуваними питаннями, наук. Так, наприклад, кінетика вивчає процеси, що виникають у системах, виведених з термодинамічної рівноваги внаслідок дії зовнішніх сил або зв'язаних з переходом у стан рівноваги, хімічні процеси, їхньої швидкості і закономірності їхнього протікання в часі, тобто, процеси, за допомогою яких атоми або молекули переходять від однієї стабільної конфігурації до іншої, долаючи енергетичний „бар'єр”, який дорівнює енергії активації. У свою чергу, необоротна термодинаміка кількісно вивчає нерівноважні процеси переносу енергії, кількості руху, маси і заряду в різних фізичних системах (газах, рідинах, твердих тілах) у їхньому взаємозв'язку, визначає їх швидкості і дозволяє одержати ряд нових закономірностей. Термодинаміка незворотніх процесів строго феноменологічна наука, яка ставить перед собою дві основні задачі:

- 1) встановити взаємозв'язок різних незворотніх явищ (процесів);
- 2) досліджувати поведінку макроскопічних систем при менш ізольованих умовах, ніж у рівноважній, класичній термодинаміці (точніше термостатиці). При цьому необоротна (нерівноважна) термодинаміка дає загальну основу макроскопічного описання незворотніх процесів. В підсумку еволюція системи визначається її змінами, "кінетикою". Однак різноманіття рівнянь цієї кінетики не дозволяє добитися істотних результатів, що стосуються загальних закономірностей [8, 10, 29].

Місце і значення термодинамічних методів стосовно незворотніх (нерівноважних) явищ можна оцінити тільки шляхом порівняння з більш фундаментальними статистичними методами. Тому теоретичною основою нерівноважної термодинаміки є нерівноважна статистична термодинаміка, заснована на статистичній механіці. Її основна задача — вивести рівняння нерівноважної термодинаміки методами статистичної механіки (наскільки це можливо), тобто з рівнянь квантової або класичної механіки встановити вираз для кінетичних коефіцієнтів через мікроскопічні характеристики, обґрунтувати їхні властивості симетрії і довести флуктуаційно-дисипативні теореми.

Взагалі, загальний термодинамічний розгляд будь-якого процесу не розкриває його молекулярного механізму (кінетики), але корисний тим, що систематизує широке коло явищ з єдиних позицій (законів перетворення енергії), доповнює молекулярно-кінетичну картину процесу і полегшує вивчення останньої, при чому, у більшості випадків не потрібно ніяких спеціальних гіпотез про внутрішній механізм явищ. Разом з тим, термодинамічні висновки мають достатню вірогідність, як і основні закони термодинаміки, які є широким узагальненням дослідних даних.

Таким чином, необоротну термодинаміку можна віднести до фізичної кінетики, застосування якої разом з формальною (хімічною) кінетикою приводить до одержання нових результатів у трибології і триботехніці.

2.3 Вибір об'єктів і машин тертя для проведення трибокінетичного експерименту

Проведення трибокінетичних дослідів обумовлено необхідністю експериментально визначити за допомогою кінетичної моделі та методики оцінки кінетичних та енергетико-активаційних характеристик оцінки зносостійкості матеріалів трибоспряжень, виявлення енергетико-активаційної природи структурної пристосованості (СП) матеріалів під час тертя, вивчення змін вказаних характеристик оцінки зносостійкості матеріалів з метою виявлення діапазону інваріантності їхніх значень або інших характерних закономірностей.

Тому вибір об'єктів для вказаних дослідів обумовлений необхідністю використання найбільш відомих, добре вивчених і широко розповсюджених у триботехніці й у реальних вуздах тертя авіаційної техніки конструкційних і мастильних матеріалів. Ці вимоги залишаються справедливими і при дослідах які істотно відрізняються за основними параметрами від уже випробуваних матеріалів трибоспрямижень. Найбільше повно переліченим вимогам відповідає легована сталь ШХ15 (ГОСТ 801-78). Легована сталь ШХ15 застосовується для виготовлення деталей шарикопідшипників — кілець, роликів, шариків, які піддаються при терті впливу високих перемінних питомих навантажень, корозії й абразивному зношуванню. До того ж, це єдиний конструкційний матеріал, який застосовують у стандартних трибологічних випробуваннях за ГОСТ 9490-75 і ДСТУ 23.221-84.

Для мастильних матеріалів до перелічених вимог — побажанням додаються додаткові, індивідуальні вимоги, обумовлені різними умовами проведення дослідів. Так, наприклад, застосування найбільш розповсюдженого авіаційного (реактивного) палива ТС-1 для реактивних двигунів ГСТУ 320.00149943.011-99, призначеного для закладання до державного резерву (доготривалого зберігання) обумовлено використанням моделі граничної змазки зі зведенням до мінімуму гідродинамічного ефекту, а також проведенням дослідження на машинах тертя КИИГА-2 або УПС-01, призначених для досліджень змащувальних властивостей авіаційних палив (вуглеводневих рідин) в умовах тертя ковзання, що відтворюється між трьома сферичними поверхнями (діаметр куль 25,40 мм) і плоским диском, виготовлених зі сталі ШХ15 [1, 21].

Особливе значення для проведення дослідів має вибір машини тертя, тому що проведення дослідів навіть на декількох машинах — тривалий і трудомісний процес, що вимагає значних матеріальних витрат. Від застосовуваної машини тертя залежить геометрична форма зразків і їх контакту, підготовка зразків і порядок виконання операцій при проведенні дослідів, а також критерій оцінки зносу.

Існують стандартні машини тертя ЧШМ (ГОСТ 9490-75), „МАС-1”,

МАСТ-2 (ДСТУ 23.221-84) зі схемою контакту сфера-сфера (чотири кулі). Але перелічені недоліки (розділ 1.1) і існування більш досконалих, ніж стандартні, машин тертя — КИИГА-2 та УПС-01, з подібною схемою контакту сфера — площина (три кулі — плоский диск) і геометричними, кінематичними відмінними рисами, що дозволяють одержати ряд переваг (у порівнянні з чотирьохшариковими машинами):

1. Можливість проведення дослідів як мастильних, так і конструкційних матеріалів.

У машинах тертя КИИГА-2 і УПС-01 можна використовувати різні конструкційні матеріали в обох елементах пари тертя, але виготовлення дисків — менш трудомісткий процес і технологічно більш простій, ніж виготовлення шариків.

2. Керований розподіл зносу між контактуючими елементами пари тертя (шарики зношуються більше).

3. Можливість проведення порівняно (з чотирьохшариковими машинами тертя) більшої кількості дослідів на одних зразках, виготовлених з конструкційних матеріалів.

Це досягається порівняно швидким відновленням поверхні плоского диска алмазними пастами заданої зернистості на чавунній плиті притирочним пристроєм.

4. Машини тертя КИИГА-2 і УПС-01 дозволяють проводити дослідів в широкому діапазоні навантажень (питомих тисків) P , швидкостей ковзання $V_{шк}$ і температур, що дозволяє ефективно використовувати методи планування експерименту.

5. Можливість виміру зносу обох елементів пари тертя, що дозволяє оцінювати кінетичні характеристики і критерій зносостійкості матеріалів трибоспрямижень для першого і другого порядків реакції (досліджуваного процесу) [1, 21].

Тому доцільно дослідження за обраною експериментально-розрахунковою методикою оцінки кінетичних характеристик і за критерієм зносостійкості, а

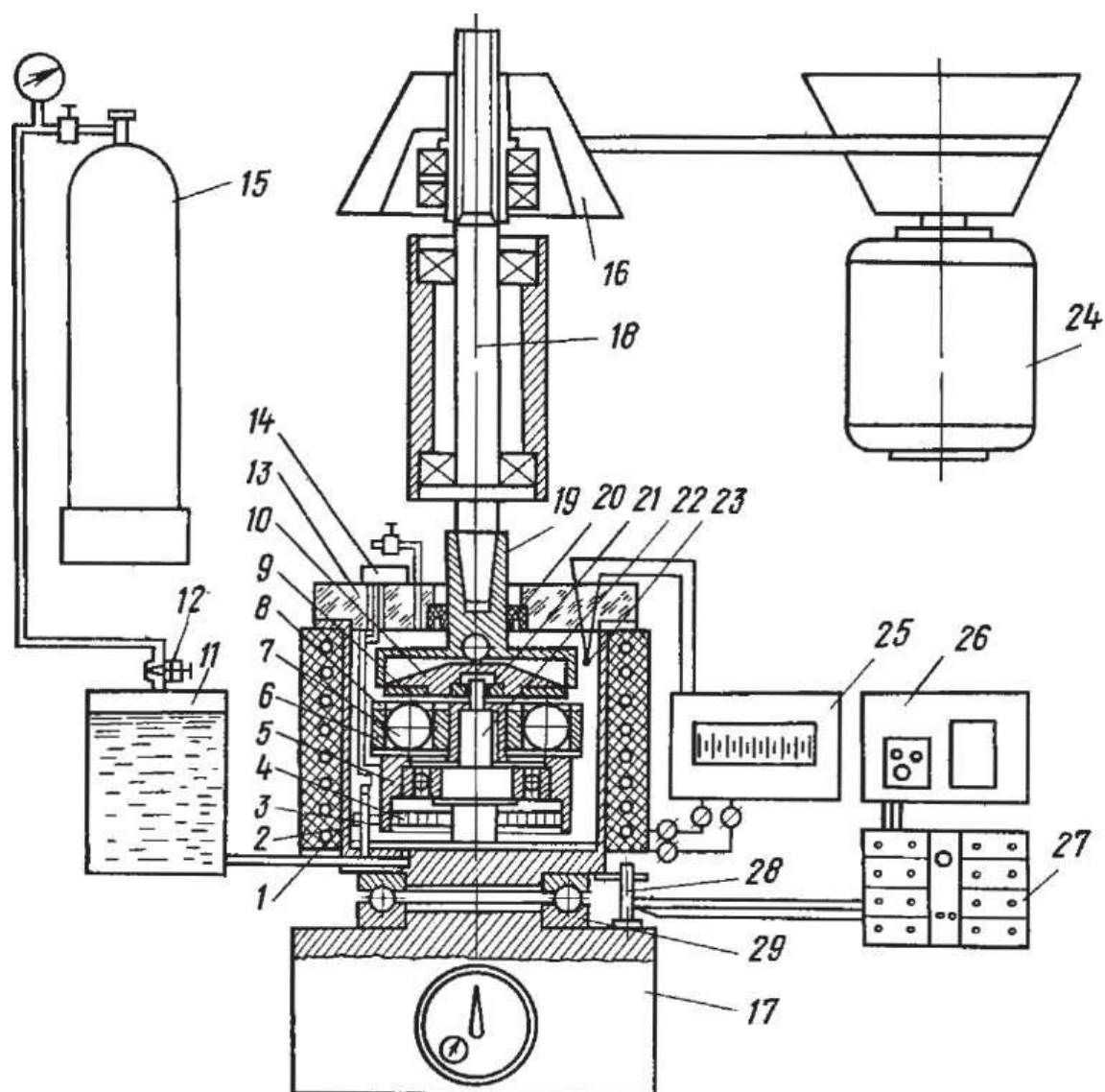
також за обраною кінетичною моделлю провести на машині тертя КИИГА-2 або УПС-01.

Для проведення трібокінетического експерименту вибираємо машину тертя УПС-01.

А далі розглянемо більш докладно лабораторний прилад УПС-01 (рисунок 2.1.). Парою тертя в приладі є плоский диск 9 і три кулі 7 діаметром 25,4 мм, виконані зі сталі ШХ15 твердістю 62-66 одиниці HRC (рисунок 2.2.). Плоский диск обертається за допомогою електродвигуна 24. Кулі монтують і фіксують від провертання в спеціальному сепараторі 6. Пара тертя поміщена в герметичну паливну камеру 2, що дозволяє проводити випробування при надмірному тиску палива і відсутності його контакту з атмосферою.

Навантаження на пару тертя створюють за допомогою електроприводу через пружинний динамометр і контролюють по стрілочному індикатору 17. Надмірний тиск палива в камері створюють і регулюють за допомогою поршневого насоса і контролюють за показаннями манометра. Паливо доготрівалого зберігання ТС-1 нагрівають за допомогою електричної спіралі 1, вміщеній в корпусі камери. Автоматичне регулювання заданої температури забезпечується за допомогою електричного потенціометра ЕПШ-2-11 і лабораторного трансформатора ЛТ.

Протизносні властивості палив визначають за величиною зношування шариків в умовах переважання механохімічного виду зношування поверхонь тертя. Мірою зносу є середній діаметр п'ятен зношування трьох шариків, які одержують у визначених умовах експерименту. Вимірювання діаметру п'ятна зношування проводиться за допомогою мікроскопа „МИМ-7” або іншого оптичного прилада, який дозволяє замірювати діаметр п'ятна зношування з точністю до 0,01 мм. Коефіцієнт варіації під час оцінки відтворюваності результатів визначення протизносних властивостей реактивних палив на приладі УПС-1 складає 4-5%.



1 - електрична спіраль; 2 - паливний камера; 3 - обмежувач; 4 - спіральна пружина; 5 - рухливий блок; 6 - сепаратор; 7-куля-зразок; 8-шайба притискна; 9-диск-зразок; 10-тримач диска-зразка; 11 - паливний бак; 12-дросельний кран; 13-кришка паливної камери; 14-кінцевий вимикач; 15-балон з азотом; 16-шків приводу плоского диска; 17 - стрелочний індикатор; 18 - вал приводу; 19 - перехідник; 20 - уплотнітельная манжета; 21 - сферіческій підшипник; 22-центральна вісь; 23-термопара; 24-електродвигун; 25-терморегулятор КМП1-502; 26-блок автоматики; 27-підсилювач; 28-тензобалка; 29-підшипник

Рисунок 2.1 – Схема лабораторного приладу УПС-01



*1 - диск-зразок; 2 - тримач диску-зразка; 3 - сепаратор;
4 - шайба прижимна; 5 - куля*

Рисунок 2.2 - Пара тертя лабораторного приладу УПС-01

Критерієм оцінки протизадирних властивостей авіаційних палив приймають граничне значення вісьового навантаження, під час якого спостерегається перехід від механохімічного зносу до зхоплення. Критичний перехід досягається рівномірним збільшенням вісьового навантаження після запуску машини. Різке підвищення сили тертя в умовах зхоплення поверхонь, які труться, фіксують за допомогою спіральної пружини і дублюють записом величини моменту тертя на осцилограмах. Коефіцієнт варіації під час визначення протизадирних властивостей реактивних палив не перевищує 9%.

Під антифрикційними властивостями розуміють здатність змащувальної речовини, у даному випадку палива, ефективно зменшувати силу тертя трибоспряжень, які труться. Звичайно антифрикційні властивості оцінюють коефіцієнтом тертя. У лабораторному приладі в процесі експерименту фіксується стає значення сили тертя і за відомою величиною навантаження розраховують коефіцієнти тертя [1].

2.4 Статистична оцінка результатів досліджень

Статистична оцінка результатів трибокінетичних досліджень не тільки встановлює адекватність і точність отриманих даних, але і дозволяє оцінити адекватність і точність методики, за якою проводили досліди і розрахунки цих даних. Статистична оцінка здійснюється за допомогою найбільш відомих і розповсюджених статистичних параметрів — середньої (стандартної) квадратичної похибки оцінки S_n довірчого інтервалу оцінки $\pm\Delta$, коефіцієнтів варіації W вказаної оцінки. Значення коефіцієнта варіації порівняльних дослідів за оцінкою відтворюваності результатів визначення протизносних властивостей різних авіаційних палив на машині тертя УПС-1, тобто при постійних значеннях вісьового навантаження P , швидкості ковзання $V_{шк}$ температури T и тривалості дослідів t в умовах переваги механо-хімічного зношування поверхонь тертя, уже встановлені — $W = 4...5 \%$. Тому порівняння значень W , дозволяє встановити точність оцінки кінетичних характеристик і енергетико-активаційного критерію зносостійкості матеріалів, зробити висновки про стан системи тертя (стаціонарне або нестійке) при використанні обраної експериментально-розрахункової методики і кінетичної моделі.

Розрахунок середньої (стандартної) квадратичної похибки визначення (виміру) або стандарт виміру проводили за наступною формулою (2.1):

$$S_n = \sqrt{\frac{(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{x} - x_2)^2 + \dots + (\bar{x} - x_n)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (2.1)$$

де $\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ — середнє арифметичне значення оцінюваної (вимірюваної) величини;

x — її дійсне значення.

У даному випадку S_n — середня квадратична похибка одиничної оцінки при n оцінках. Якщо число оцінок n , дуже велике, то підтверджена випадковим коливанням величина прагне до постійного значення σ , яку називають статистичною межею S_n , тобто (2.2):

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n \quad (2.2)$$

Саме ця межа і називається середньою квадратичною похибкою. Як справедливо вказував А.Н.Зайдель, у дійсності завжди обчислюють не величину σ , а її наближене значення S_n яке тим ближче до σ , чим більше n .

Коефіцієнт варіації W — відносна величина середньої квадратичної похибки, виражена у відсотках, яку розраховували за формулами (2.3) та (2.4):

$$W = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \quad (\text{для генеральної сукупності}) \quad (2.3)$$

$$W = \frac{S_n}{\bar{x}} \times 100\% \quad (\text{для вибіркової сукупності}) \quad (2.4)$$

Довірчий інтервал $\pm \Delta$ — інтервал значень від $x - \Delta$ до $x + \Delta$ (x — дійсне значення визначеної величини) розраховували за формулою:

$$\Delta = \frac{t_{\alpha n} \times S_n}{\sqrt{n}} \quad (2.5)$$

де $t_{\alpha n}$ — коефіцієнт Стюдента, який розраховується за законами теорії імовірності для різних значень n і α , звичайно значення $t_{\alpha n}$ наводиться в таблицях;

α - коефіцієнт надійності або довіря імовірності, задається характером проведенних оцінок. Більш високий ступінь надійності, необхідний при відповідальних оцінках, збільшує (у частках σ) довірчий інтервал і вимагає багаторазового повторення оцінок. При звичайних оцінках можна обмежитися

коефіцієнтом надійності 0,9 або 0,95, Для особливо точних оцінок, за умовами яких потрібно надзвичайно високий ступінь надійності, задають довірчу імовірність $\alpha = 0,999$.

У даній роботі велика величина α не потрібна, тому у всіх наступних розрахунках статистичних параметрів задаємо $\alpha = 0,95$. Вказана довірча імовірність відповідає подвоєній середній квадратичній похибці — 2σ , яка вказує на зручність застосування $S_n(\sigma)$ у якості основного чисельного виразу похибки оцінки.

Таким чином, статистична оцінка результатів трибо-кінетичних дослідів дозволяє судити про точність кінетичних і енергетико-активаційних характеристик зносостійкості матеріалів трибоспряжень, про адекватність і конструктивність експериментально-розрахункової методики і кінетичної моделі.

Висновки до розділу 2

Після проведеної оцінки машин тертя, матеріалів і авіаційних палив встановлено для проведення дослідження за обраною експериментально-розрахунковою методикою оцінки кінетичних характеристик і за критерієм зносостійкості підходять: машина тертя УПС-1; сталь ШХ15, реактивне паливо ТС-1 довготривалого зберігання.

3 ФІЗИЧНА І КІНЕТИЧНА МОДЕЛЬ І МЕТОДИКА ТРИБОКІНЕТИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1 Фізична модель процесів, які враховуються під час механо-хімічного зношування.

У обраній фізичній моделі стан системи тертя (СТ) до початку руху визначається присутністю на поверхнях тертя рівноважних структур — окислів, адсорбційних шарів, хімічних сполук, близьких до стехіометричних (з врахуванням дефектів поверхневих шарів), і ін. Кількісними характеристиками цих рівноважних структур є екстремуми термодинамічних потенціалів: максимум ентропії, мінімум вільної енергії Гіббса або Гельмгольца й ін. [4].

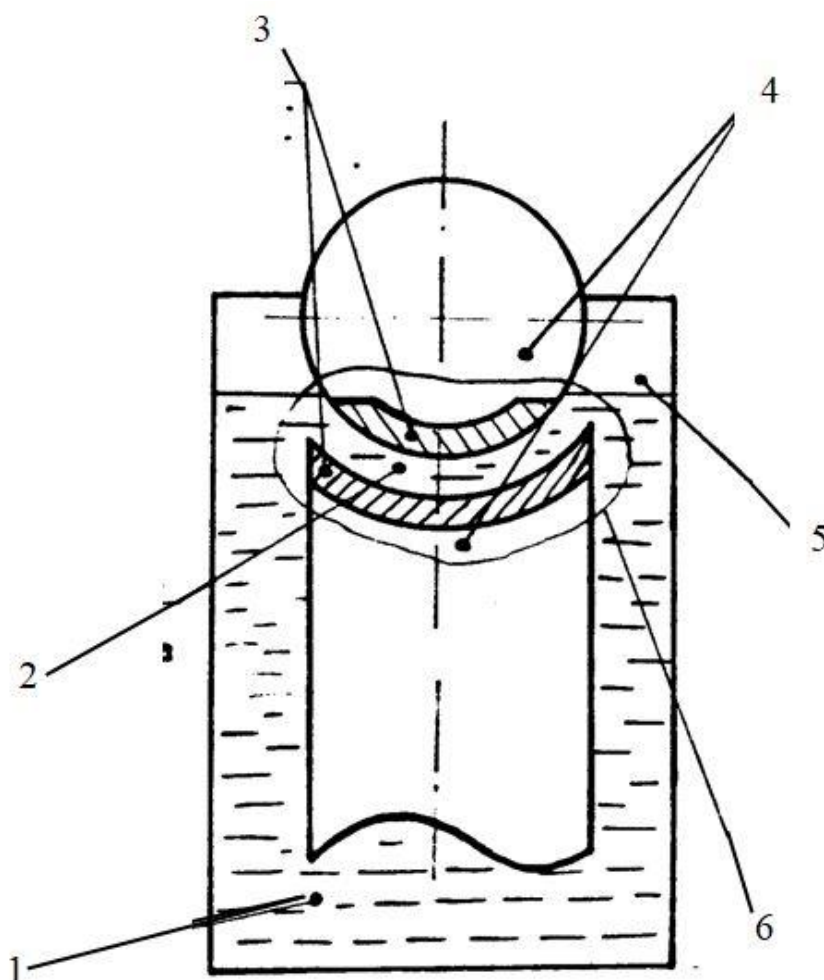
З початком руху в СТ виникає дисипативна неоднорідність визначальних параметрів — градієнта температур, електрохімічного потенціалу, щільності дислокації й ін.. При цьому русі тертя розглядається як обумовлена трибологічна реакція (трибореакція ТР), яка протікає як у динамічній необоротній відкритій СТ, яка обмінюється із середовищем енергією і речовиною, так і в закритій, без обміну речовиною. При визначених критичних значеннях потоку енергії (зовнішнього впливу, наприклад, збільшення P , $V_{ск}$) у СТ утворюються нові, на відміну від рівноважних, стійкі, дисипативні структури, які відповідають видам змазки (тертя) — гідродинамічній, граничній (адсорбційній), твердій (механо-хімічній) і іншим. До дисипативних структур (ДС) відносять молекулярно-агреговані шари (рідкі кристали, трибополімери, трибометалополімери) і нестехіометричні з'єднання. При чому, деякі ДС не стабільні, розпадаються миттєво після припинення руху (гідродинамічні), а деякі навпаки — метастабільні (трибополімери і нестехіометричні з'єднання). До того ж ДС, на відміну від рівноважних структур, не характеризуються термодинамічними потенціалами, що у незворотніх процесах, яким є тертя, відсутні, а описуються функціоналом процесу, що називають функціоналом деградації [4,5].

Переходи від одного виду змазки (тертя) до іншого не є безперервними, тому що представляють собою дисипативні фазові переходи, які приводять до

зміни механізму трибореакції (ТР). Кінетичне описання ТР за допомогою диференціальних рівнянь може бути зроблене коректно тільки для кожного незмінного механізму ТР. У загальному випадку, коли можуть змінюватися види тертя (змащення), необхідне застосування безперервно-дискретних методів [5].

У обраній моделі обмежилися розглядом досить складного випадку граничної змазки (тертя), при якій протікає механо-хімічне зношування. Стадіями такий ТР можуть бути фізична адсорбція, хемосорбція, термо- і екзо-електронна емісія, дифузія, пластична деформація, деструкція молекул змазки, руйнування твердого тіла й інші фізичні процеси. Ці стадії не є елементарними, однак вже при такій деталізації ТР її аналітичне описання стає надзвичайно складним. Взагалі, об'єднання підпроцесів в укрупнені стадії можливо при наявності кінетично визначального, тобто істотно повільного, підпроцесу і виконується, виходячи з поставленої задачі дослідження. Найбільш оптимальним сполученням кількісної оцінки кінетичних і енергетико-активаційних характеристик зносостійкості матеріалів всіх стадій ТР із максимальною інформативністю моделі є тристадійна трибореакція, яка включає адсорбцію (А), хімічне модифікування (М) поверхневих шарів (утворення дисипативних вторичних структур), що може супроводжуватися пластичною деформацією поверхонь тертя, і руйнування (Р) вторичних структур. Аналітичне описання такої моделі можна здійснити методами формальної (хімічної) кінетики (класичним) або евристичним, який дозволяє сформулювати рівняння динамічної рівноваги і саморегулювання процесів утворення і руйнування дисипативних вторичних структур. У першому випадку математична модель представляє собою систему диференціальних рівнянь першого порядку, у другому — диференціальне рівняння з запізнілим аргументом [4,5].

Схема системи тертя складається з ефективних шарів контактуючих конструкційних матеріалів і ефективної зони мастильного матеріалу (рисунок 3.1).

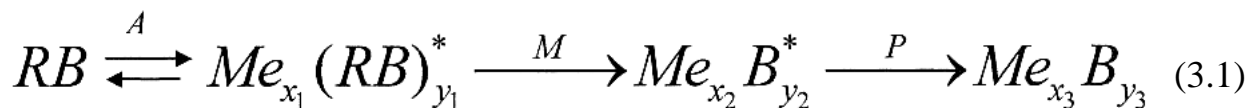


1-мастильний матеріал; 2-ефективна зона мастильного матеріалу;
 3-ефективна зона конструкційних матеріалів; 4-конструкційні матеріали;
 5-газове середовище; 6-система тертя

Рисунок 3.1 - Схема системи тертя

3.2 Кінетична модель нормального механо-хімічного зношування

Обрана фізична модель механо-хімічного зношування описує вихідний і наступний стани СТ, але не відповідає на дуже важливе питання: як, з якою швидкістю і якими енергетичними витратами здійснюється перетворення рівноважних структур у дисипативні вторинні структури і руйнування останніх. Це питання вивчає кінетика, зокрема, кінетична модель тристадійної ТР, для опису якої використана наступна схема реакції (рисунок 3.2)



RB - мастильний матеріал, RB — активний компонент мастильного матеріалу (присадка), R — вуглеводневий радикал присадки; B — активний компонент присадки; Me — ювенільні ділянки поверхонь контактуючих конструкційних матеріалів трибоспряжень. $Me_{x_1} (RB)_{y_1}^*$ — адсорбційний комплекс; $Me_{x_2} B_{y_2}^*$ — модифіковані (дисипативні вторичні) структури, активні стосовно стадії руйнування (P); $Me_{x_3} B_{y_3}$ — комплекс поверхневого руйнування (продукти зносу) по суті - продукт трибореакції. Індексами x_i , y_i позначені парціальні коефіцієнти компонентів; * - активні комплекси ТР

Рисунок.3.2 - Схема тристадійної трибокінетичної реакції

Як видно з рівняння ТР (3.1), тільки перша стадія — адсорбція А прийнята оборотною (двосторонньою). Інші стадії вважаємо істотно необоротними (однобічними). Ювенільні ділянки контактуючих конструкційних матеріалів є як вихідним реагуючим компонентом, так і каталізатором ТР, який прискорює протікання першої стадії А. При цьому, загальна площа ювенільних ділянок (концентрація Me) при нормальному (стаціонарному) зношуванні залишається постійною, тоді як кількість вихідних матеріалів постійно зменшується внаслідок зношування. Кількість мастильного і конструкційного матеріалів передбачається досить великою, і їхня концентрація не залежить від тривалості ТР. У протилежному випадку необхідно застосовувати абсолютні кількості, а не концентрації.

Найбільш повним описом рівняння ТР (3.1) є наступна система диференціальних рівнянь (3.2-3.5):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d[RB]}{dt} = -K_1^a [RB] + K_2^a [Me_{x_1} (RB)_{y_1}^*] \\ \frac{d[Me_{x_1} (RB)_{y_1}^*]}{dt} = K_1^a [RB] - (K_2^a + K^M) [Me_{x_1} (RB)_{y_1}^*] \\ \frac{d[Me_{x_2} B_{Y_2}^*]}{dt} = -K^P [Me_{x_2} B_{Y_2}^*] + K^M [Me_{x_1} (RB)_{y_1}^*] \\ \frac{d[Me_{x_3} B_{y_3}]}{dt} = K^P [Me_{x_2} B_{y_2}^*] \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (3.2) \\ (3.3) \\ (3.4) \\ (3.5) \end{array}$$

де K_1^a , K_2^a , K^M , K^P — константи швидкості відповідно адсорбції, десорбції, хімічного модифікування і поверхневого руйнування;

t - тривалість (час) ТР; квадратні дужки позначають концентрації відповідних компонентів [5].

3.3 Методика трибокінетичного експерименту

Встановлена адекватність і конструктивність кінетичної моделі в роботі О.І.Богдановича дозволяє проводити оцінку на якісно більш високому рівні, тобто, шляхом порівняння розрахункових і експериментальних даних, або шляхом прогнозування даних і експериментального підтвердження прогнозу. Для проведення дослідів використовую розроблену методику експериментальної оцінки кінетичних і енергетико-активаційних характеристик зносостійкості матеріалів трибоспрямижень для кожної стадії ТР, засновану на законах фізико-хімічної кінетики, яка найбільше повно описують ТР. Тому оцінку кінетичних і енергетико-активаційних характеристик зносостійкості проводили відповідно до основних законів хімічної кінетики, замінивши концентрації реагуючих речовин в істинно хімічній реакції на кількісні значення матеріалів, які беруть участь у кожній стадії ТР, тобто оцінку проводили в три етапи:

1. Проведення трибокінетичних дослідів (оцінка зміни кількісних значень матеріалів, які беруть участь у кожній стадії ТР при різній тривалості дослідів $-t$) і побудова графіка залежності логарифмів цих кількісних значень від t , або зворотної залежності кількісних значень від t .

2. Розрахунок значень порядку N і константи швидкості K досліджуваних стадій ТР.

3. Проведення трибокінетичних дослідів при декількох різних температурах T_1, T_2, \dots, T_n і розрахунок значень енергій активації за рівнянням Арреніуса.

У даному випадку кількість етапів строго не регламентується і може бути більше (чотири) або менше (два), але зміст, необхідний обсяг і перелік робіт для проведення успішної оцінки кінетичних і енергетико-активаційних характеристик зносостійкості повинні залишатися незмінним. У протилежному випадку здійснити таку оцінку не представляється можливим. Тепер стисло охарактеризуємо основні етапи, необхідні для здійснення такої оцінки.

Спочатку (1 етап) необхідно провести трибокінетичні дослідів матеріалів трибоспрями, які можна проводити двома способами:

1) не зупиняючи машини тертя від початку і до кінця дослідів заданої тривалості t ;

2) зупиняючи через інтервали часу $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ для проведення необхідних вимірів.

Обидва способи можуть бути використані в триботехніці, тому що обидва були експериментально перевірені на машинах тертя КИИГА-2 (УПС-01) і МТ-1. Розбіжність значень критерію оцінки зносостійкості (енергії активації поверхневого руйнування E^p) при дослідів на КИИГА-2 і УПС-01 (відносна похибка двох оцінок $\approx 4-5\%$) пояснюється взаємодією поверхонь тертя конструкційних матеріалів і поверхні досліджуваного мастильного матеріалу з оточуючим машину тертя газовим (повітряним) середовищем, яке має місце при зупинці дослідів і проведенні необхідних вимірів, а також незначною відмінністю швидкості ковзання машин тертя КИИГА-2 (1,18 м/с) і УПС-01 (1,22 м/с) і деякими особливостями виконання.

Підготовку зразків з конструкційних і мастильних матеріалів і порядок проведення дослідів здійснювали згідно [1, 21].

Потім, згідно отриманим даним трибокінетичних дослідів, будують графік залежності логарифма кількості матеріалу досліджуваної стадії від тривалості

(часу) дослідів t , припускаючи порядок реакції цієї стадії $N \approx 1$. Якщо така залежність лінійна, то $N \approx 1$, тобто наше припущення підтвердилося. У протилежному випадку (якщо ця залежність нелінійна) $N \geq 2$ і необхідно побудувати графік зворотної залежності кількості матеріалу від t , припустивши $N \approx 2$. Лінійність такої залежності підтверджує правильність припущення $N \approx 2$. У протилежному випадку (нелінійність такої залежності) $N > 2$ і оцінити кінетичні характеристики для такої стадії не представляється можливим. Але це обмеження майже не знижує можливостей експериментально-розрахункової методики оцінки кінетичних і енергетико-активаційних характеристик зносостійкості кожної стадії ТР, тому що за літературним даними трибохімічні (трибокінетичні) реакції мінеральних і жирових мастильних матеріалів мають, як правило, перший порядок (це підтвердилось експериментальними даними, представленими роботі), і тільки силосанові — більш першого порядку [5].

Лінійність вказаних залежностей графічно встановлює і значення константи швидкості K досліджуваної стадії, рівної тангенсу кута нахилу прямої до осі абсцис (ot). До того ж, графіки цих залежностей виявляють відхилення експериментальних даних (точок) від рівняння, яке описує побудований графік, тобто від прямої, а також найбільш простіше оцінюють використовуючи усю сукупність експериментальних даних. У випадку, коли відхилення точок від прямої не перевищують припустимого довірчого інтервалу, порядок і константу швидкості досліджуваної стадії ТР визначали аналітично, тобто, розрахунковим шляхом, за відповідним формулах.

2 етап. Графічна оцінка порядку і константи досліджуваної стадії — наближена. Більш точні значення вказаних кінетичних характеристик встановлювали аналітично, тобто розраховують за формулами. Так, наприклад, порядок досліджуваної стадії розраховували за формулою (3.6):

$$N = \frac{\lg \frac{w_1}{w_2}}{\lg \frac{a_1}{a_2}} \quad (3.6)$$

де w_1 і w_2 — швидкості досліджуваної стадії (процесу), які відповідають початковим кількостям (концентраціям) реагуючих матеріалів a_1 і a_2 відповідно [5,32].

Реагуючими матеріалами кожної стадії ТР, за аналогією з хімічними реакціями, є вихідні матеріали (речовини), які приймають участь у даній стадії і претворюються в продукти цієї стадії. Наприклад, реагуючим матеріалом 1 стадії ТР є мастильний матеріал, у найпростішому випадку — активний компонент мастильного матеріалу — присадка, продукт – адсорбційні комплекси. При цьому оцінку кінетичних характеристик можна проводити за кожним матеріалом (речовиною), який бере участь у ТР, тобто як за реагуючими матеріалами, так і за продуктами кожної стадії ТР. Вибір матеріалу для оцінки кінетичних характеристик обумовлений можливістю найбільш простого і доступного виміру його кількості [32].

При оцінці кількісного зменшення присадки, розрахунок порядку N для всіх стадій ТР проводили за результатами дослідів з різними початковими концентраціями (кількостями) цієї присадки, із застосуванням миттєвих (дісних) швидкостей досліджуваної стадії, тобто

$$w = \frac{dC}{dt} \quad (3.7)$$

де C — кількість (концентрація) матеріалу A_i , за яким розраховували w .

В інтегральній формі рівняння (3.7) прийме вигляд:

$$w = \frac{C}{t} \quad (3.8)$$

У випадку застосування (дослідів) інактивного мастильного матеріалу або відсутності даних про кількісне зменшення присадки, для розрахунку N 2 і 3 стадій ТР умовно прийняли за початкову кількість (концентрацію) матеріалу кількісне значення кінцевих продуктів цих стадій у момент часу t_{i-1} , за кінцеву — момент часу t_i (наступний за t_{i-1}). Таке припущення дійсне тільки при оцінці N за допомогою середніх швидкостей досліджуваних стадій (процесів). Для кожного інтервалу $\Delta t = t_i - t_{i-1}$, крім початкового, для якого $t_{i-1} = 0$ можна встановити початкову

і кінцеву кількість матеріалів (продуктів), розрахувати середні швидкості стадій \bar{w} , як середні величини для заданого інтервалу Δt :

$$\bar{w} = \frac{Z_{t_i} - Z_{t_{i-1}}}{V_{\Delta} t} \quad (3.9)$$

де Z_{t_i} і $Z_{t_{i-1}}$ — число молів (кількість) одного з реагуючих матеріалів або продуктів стадії A_i відповідно в моменти часу t_i і t_{i-1} ;

V — об'єм розглянутої системи, при вивченні стадій у розчинах зміною об'ємом розчину можна зневажити.

Знаючи \bar{w} для кожного інтервалу Δt , можна розрахувати ряд значень N , які відповідають кожному інтервалу Δt , середнє арифметичне значення яких є найбільш точним значенням N для всієї тривалості ТР. Встановити N для всієї тривалості ТР можна більш простим, менш точним і трудомістким способом, розрахувавши \bar{w} для початкового і кінцевого інтервалів Δt , за формулою (3.6). Незначна розбіжність ($\approx 2,5\%$) значень N розрахованих обома способами підтверджує адекватність обох способів оцінки N і дозволяє використовувати їх у залежності від поставлених (розв'язуваних) задач.

Як правило, розрахунок N — підтвердження раніше графічно встановленого наближеного значення N , необхідний для правильного вибору формули розрахунку константи швидкості досліджуваної стадії K і перевірки правильності графічної оцінки N . Тому застосування більш простого, менш точного і трудомісткого способу цілком задовольняє цим задачам. Застосування більш точного в трудомісткого способу оцінки N має сенс при необхідності особливо точної оцінки значень.

Разом з тим, використовувану послідовність оцінки N можна змінити, розрахувавши спочатку значення N за формулою (3.6), а потім побудувавши графік відповідної залежності кількості матеріалу від t . Але тоді необхідно перерахувати спочатку N ще раз, тому що значення кількостей матеріалів, за якими розраховували N можуть бути на значному видаленні від прямої (поза

припустимим довірчим інтервалом), що спотворить дісне значення N і може привести до неправильних висновків про значення N і про побудову графіка іншої залежності. Тільки у випадку збігу значень кількості матеріалу з прямої перераховувати значення N немає необхідності, хоча й у цьому випадку точність оцінки N залишається невідомою.

Значення константи швидкості K досліджуваної стадії (процесу), на відміну від N , необхідно установити з максимально можливою точністю, тому що за значеннями K розраховували значення критерію оцінки зносостійкості матеріалів трибоспрями — енергію активації поверхневого руйнування матеріалів E^p , від адекватності і точності оцінки K залежить точність і адекватність оцінки E^p . Графічна оцінка K , за тангенсом кута нахилу прямої до осі абсцис, оцінює наближені значення, які можна використовувати тільки для порівняльних дослідів, тому що кут нахилу прямої залежить від масштабу координат. Разом з тим, графічно встановлені значення K — залежить одне підтвердження адекватності проведеної оцінки, якщо їхні значення збігаються з розрахунковими. Зворотне — свідчить про неправильну, помилкову оцінку K [7]

Найбільш точні й адекватні значення K розраховували, використовуючи інтегральну форму кінетичного рівняння для кожного інтервала між двома експериментальними точками, які лежать на прямій. Для цього використовували наступні рівняння (3.10-3.12):

1) для першого порядку ($N \approx 1$)

$$K = \frac{\Delta B}{\Delta t} \times \frac{1}{B_c} \quad (3.10)$$

$$K = \frac{1}{t} \ln \frac{B_0}{B} \quad (3.11)$$

2) для другого порядку

$$K = \frac{1}{t(B_0 - D_0)} \ln \frac{D_0 B}{B_0 D} \quad (3.12)$$

де $\Delta V = B_i - B_{i-1}$ — інтервал кількостей реагуючих матеріалів відповідних двом крайнім значенням інтервалу Δt , $B_i - t_i$ і $B_{i-1} - t_{i-1}$ відповідно;

$B_c = \frac{B_i + B_{i+1}}{2}$ — середнє арифметичне значення кількостей реагуючого матеріалу;

B_0 і D_0 — вихідна кількість реагуючих матеріалів відповідно 1 і 2 елементів пари тертя;

B и D — кількість реагуючих матеріалів 1 і 2 елементів пари тертя до моменту часу t .

При першому порядку процесу (стадії) для розрахунку K існує ще одна формула (3.13):

$$K = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{B_i}{B_{i-1}} \quad (3.13)$$

яка в даній роботі не використовувалася, тому що по формулах (3.10) і (3.11) були отримані більш точні значення K , з найменшими коефіцієнтами варіації. При чому для 1 і 2 стадій ТР найбільш точні (з найменшим коефіцієнтом варіації) значення розраховували за формулою (3.11), тобто з використанням значень кількостей речовин у даний момент часу, а для 3 стадії — за формулою (3.10) із застосуванням кінцевої різниці замість диференціалів. При цьому усі формули розрахунку N і K (аналогічні формулам хімічної кінетики і відрізняються кількісною характеристикою реагуючого матеріалу (речовини): у хімічній кінетиці кількість речовини вимірюють у молях, а ТР кількість реагуючого матеріалу кожної стадії вимірюють індивідуальних, властивих тільки однієї, даної стадії, кількісних характеристиках. Наприклад, кількість реагуючого матеріалу 1 стадії ТР вимірюють збитком концентрації присадки, яка адсорбується на ювенільних ділянках конструкційних матеріалах пари тертя, 2 стадії — площею дисипативних вторичних структур або відносною площею цих структур, 3 стадії — кількісною величиною зносу обох елементів пари тертя.

Враховуючи важливість максимально точної оцінки K , яку оцінювали статистичними параметрами, зокрема, середньою квадратичною похибкою,

коефіцієнтом варіації, довірчим інтервалом значення K розраховували не менш трьох разів, тобто для трьох інтервалів Δt . Максимальна кількість значень K необмежена і повинна виправдовувати часові і матеріальні затрати на їх оцінку. При цьому збереження постійності розрахованих значень K у межах похибок досвіду, відсутність їх систематичного „ходу” — ще одне підтвердження першого порядку досліджуваної стадії (процесу). Взагалі, систематичне зменшення значень K є ознакою заниження передбачуваного порядку і навпаки. Розрахунок енергії активації досліджуваної стадії E за рівнянням Арреніуса проводили із середньо арифметичними значеннями K - K_c [5,7]

3 етап. Згідно рівняння Арреніуса для розрахунку енергії активації досліджуваної стадії E необхідно встановити значення K хоча б при двох температурах T_1 і T_2 , тобто необхідно повторити етапи 1 і 2 при іншій, відмінній від T_1 температурі T_2 . При цьому розрахунок E можливий у випадку виконання закону Арреніуса — зі збільшенням T значення K збільшуються, тобто якщо $T_1 < T_2$, то $K_1 < K_2$ і навпаки. Не виконання цієї умови приводить до негативних значень E ($E < 0$), що не має фізичного змісту, відповідно до рівняння Арреніуса (3.14), за яким розраховували енергію активації досліджуваної стадії:

$$E = \frac{RT_1T_2 \ln K_2/K_1}{T_2 - T_1} = \frac{1,9144T_1T_2 \lg K_2/K_1}{T_2 - T_1} \times 10^{-2} \left(\frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \right) \quad (3.14)$$

де K_1 і K_2 — константи швидкості досліджуваної стадії, встановлені при температурах T_1 і T_2 відповідно;

1,9144 — добуток газової постійний $R = (8,3143 \pm 0,0012) \cdot 10^3$ Дж/°К.моль на модуль переводу натуральних логарифмів у десяткові, рівний 2,3036.

Мінімально необхідна кількість K_c для розрахунку одного значення E дорівнює двом. Чим більше розраховано значень E , тим адекватніше оцінка вказаних значень. Максимально можлива кількість значень E не обмежено, але повинно виправдувати матеріальні і часові витрати на їхню оцінку. Наприклад, проведення дослідів при трьох температурах T_1 , T_2 і T_3 дозволяє розраховувати три значення E (для інтервалів T_{1-T2} , T_{2-T3} і T_{1-T3} , здійснити статистичну обробку

отриманих даних, розрахувавши довірчий інтервал $\pm \Delta E$ і коефіцієнт варіації оцінки E , графічно встановити значення E , рівне тангенсу кута нахилу прямої залежності $\lg K = f\left(\frac{1}{E}\right)$ до осі абсцис. Але використання різних за величиною температурних інтервалів ΔT при оцінці E може збільшити коефіцієнт варіації, тобто знизити точність такої оцінки. Тому більш адекватний і точний розрахунок трьох значень E можна здійснити за трьома чисельно рівними температурними інтервалами ΔT , для чого необхідне проведення 1 і 2 етапів оцінки кінетичних характеристик зносостійкості матеріалів трибоспряжень E при чотирьох значеннях T [5].

Висновки до розділу 3

Представлена методика оцінки кінетичних характеристик і енергетико-активаційного критерію оцінки зносостійкості матеріалів трибоспрямижень трьох взаємозалежних і взаємообумовлених стадій ТР, використовуючи методологію фізичної хімії (хімічної кінетики), дозволяє оцінювати порядок N , константу швидкості K і енергію активації кожної стадії ТР двома способами — графічно й аналітично (розрахунковим шляхом). До того ж, відсутність „ходу” значень K підтверджує правильність оцінки N , що підвищує адекватність оцінки. Взагалі, оцінка N , K і E двома способами значно підвищує адекватність і точність (у 2 рази) отриманих результатів у порівнянні з відомими методиками оцінки зносостійкості. До того ж, представлена методика використовує будь-які кількісні критерії оцінки кількостей реагуючих матеріалів — об’єм, вагу, масу, концентрацію (процентну, об’ємну, мольну) і ін. Постійність значень E в діапазоні нормального механо-хімічного зношування, що відповідає діапазону структурної пристосовуваності матеріалів під час терті (СП), дозволяє значно скоротити тривалість оцінки зносостійкості в вказаному діапазоні.

Застосування представленої методики оцінки N , K і E обмежено необхідністю лінійних залежностей логарифма кількості реагуючих матеріалів або зворотної величини кількості вказаних матеріалів від t , тобто оцінка кінетичних характеристик можлива при $N \leq 2$. До того ж, необхідність дотримання закону Арреніуса зменшує можливий температурний інтервал оцінки N , K і E .

4 ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ АКТИВАЦІЇ ПОВЕРХНЕВОГО РУЙНУВАННЯ СТАЛІ ШХ15 В ПАЛИВІ ТС-1 ДОВГОТРИВАЛОГО ЗБЕРІГАННЯ

4.1 Результати експериментальної оцінки енергії активації поверхневого руйнування сталі ШХ15 в паливі ТС-1 довготривалого зберігання

Трибокінетичні досліді проводили на машині тертя УПС-1, без збиткового тиску в камері, при навантаженні $P = 98,1$ Н, температурі $T_1 = 303$ °К та $T_2 = 333$ °К та швидкості ковзання $V_{шк} = 1,25$ м/с. Конструкційний матеріал пари тертя — єдиний матеріал, який використовують у стандартних трибологічних дослідіах за ГОСТ 9490-75 і ДСТУ 23.221-84 легована сталь ШХ15. У даній роботі у якості мастильного матеріалу для трибокінетических дослідів використовували вуглеводневу рідину — реактивне паливо марки ТС-1 довготривалого зберігання (ДСТУ 320.001249943.011-99) Кременчуцького НПЗ .

Трибокінетичні досліді проводили при вище згаданих значеннях P , $V_{ск}$ і T , без зупинок через інтервали часу Δt (табл. 4.1). Після кожного досліді заданої тривалості t вимірювали за допомогою мікроскопа МИМ-7 при 70-ти кратному збільшенні (точність виміру складала 0,0143 мм, тому що одина поділка вимірювальної шкали дорівнює 1 мм) два взаємоперпендикулярних діаметри плями зносу кожного шарика і розраховували середні арифметичні значення плями зносу d , середні значення d трьох плям зносу (шариків) d_c , середні значення d_c трьох або більш дослідів d_{cp} довірчий інтервал оцінки $d_c - \Delta d_c$, у, за формулою (2.5), коефіцієнт варіації оцінки $d_c - W$.

Кількісним критерієм оцінки зносу є сумарний об'єм руйнування (зношування) трьох шариків (плям зносу) V , які мають форму шарикового сегмента, діаметр основи якого дорівнює діаметру плями зносу. При цьому V дорівнює сумі трьох об'ємів шарикових сегментів $V_{ш}$, розрахованих за d для кожного шарика (плями зносу).

Таблиця 4.1- Результати трибокінетичних дослідів з експериментальної оцінки зносостійкості сталі ШХ15 в середовищі реактивного палива ТС-1 доготривалого зберігання

| Температура проведення дослідів °C | Время испытания, мин | Середнє арифметичне значення двох взаємоперпендикулярних діаметрів кожного п'ятна зноса (шара), d , мм | Середні значення d трьох п'ятен зносу, d_c , мм | Середні значення d_c , трьох або більше дослідів, d_{cp} , мм | Довірчий інтервал оцінки, $d_c \pm \Delta d_c$, мм | Коефіцієнт варіації оцінки d_{cp} , W , % | Об'єм руйнування (зносу) розрахований за d для кожного шара, $V_{ш} \times 10^{-3}$, мм ³ | Сумарний об'єм руйнування розрахований за d для кожного шара, $V_{ш} \times 10^{-3}$, мм ³ | Середні значення V трьох або більше дослідів однакової тривалості, $V_{ш} \times 10^{-3}$, мм ³ | | | | |
|---------------------------------------|----------------------|--|---|---|---|---|---|--|---|--|--|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | | |
| 60 | 30 | 0,8356 | 0,9495 | 0,9338 | 0,0198 | 3,8 | 1,8861 | 10,0295 | 9,1009 | | | | |
| | | 0,9715 | | | | | 3,4437 | | | | | | |
| | | 1,0500 | | | | | 4,7008 | | | | | | |
| | | 1,0499 | 0,8902 | | | | 4,7010 | 7,8693 | | | | | |
| | | 0,9287 | | | | | 4,2095 | | | | | | |
| | | 0,7214 | | | | | 2,6185 | | | | | | |
| | | 1, 0494 | 0,9287 | | | | 4,7008 | 9,4081 | | | | | |
| | | 0,9186 | | | | | 2,8749 | | | | | | |
| | | 0,8386 | | | | | 1,8224 | | | | | | |

Продовження таблиці 4.1.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|----|--------|--------|--------|--------|------|---------|---------|---------|
| 60 | 40 | 1,0797 | 1,0069 | 1,0703 | 0,0481 | 9,29 | 5,3739 | 12,6949 | 15,1836 |
| | | 1,0689 | | | | | 5,2339 | | |
| | | 0,8671 | | | | | 2,0871 | | |
| | | 1,1500 | 1,0573 | | | | 6,7648 | 14,9722 | |
| | | 1,0643 | | | | | 4,9619 | | |
| | | 0,9571 | | | | | 3,2545 | | |
| | | 1,2714 | 1,2119 | | | | 10,1087 | 17,8396 | |
| | | 1,4286 | | | | | 16,1151 | | |
| | | 0,9357 | | | | | 2,9644 | | |
| 60 | 50 | 1,3215 | 1,1907 | 1,2401 | 0,0361 | 5,34 | 11,5302 | 24,3618 | 29,6399 |
| | | 1,2314 | | | | | 8,5994 | | |
| | | 1,0104 | | | | | 4,2104 | | |
| | | 1,3699 | 1,3235 | | | | 13,6862 | 37,8675 | |
| | | 1,0711 | | | | | 4,9620 | | |
| | | 1,5009 | | | | | 19,2194 | | |
| | | 1,3500 | 1,2143 | | | | 12,8502 | 26,7008 | |
| | | 1,2497 | | | | | 9,0194 | | |
| | | 1,0512 | | | | | 4,8301 | | |
| | | | | | | | | | |

Продовження таблиці 4.1.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|----|--|-------------------------------------|--------|--------|------|---|---------------------------------------|---------|
| 60 | 60 | 1,3497 1,6504 1,4681 1,5971 1,4086 1,2102 1,6930 1,5278 1,2121 | 1,4832 1,3876 1,4711 | 1,4480 | 0,0283 | 3,67 | 12,8502 28,6889 17,4443 25,8205 13,9737 8,2135 31,7901 21,5247 8,2135 | 58,9743 48,1125 61,5318 | 56,1689 |
| 30 | 30 | 1,0187 0,7899 0,9431 1,0000 0,9357 0,8143 1,0246 0,9121 0,7694 | 0,9210 0,9147 0,91024 | 0,9227 | 0,0052 | 1,9 | 4,2105 1,5309 3,0498 3,8598 2,9537 1,7001 4,3285 2,6185 1,3692 | 8,8034 8,6236 8,3153 | 8,5640 |

Продовження таблиці 4.1.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|----|--|--|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--|--|---------|
| 30 | 40 | 1,1571 0,9802 0,8643 1,1205 0,8798 0,9689 1,0490 0,9296 0,8029 | 1,0012 1,0156 0,9386 | 0,9784 | 0,0261 | 4,6 | 6,9345 3,5461 2,1576 7,8314 2,3038 3,4437 4,7008 2,9644 1,5279 | 12,6452 13,6112 9,2111 | 11,0798 |
| 30 | 50 | 1,2430 1,0796 0,9062 1,1119 1,0858 0,9301 1,1786 1,0502 0,8499 | 1,0801 1,0716 1,0257 | 1,0534 | 0,0149 | 3,6 | 9,3011 5,2342 2,6095 8,0190 5,3841 2,8750 7,4628 4,6984 2,0192 | 17,0798 16,3686 14,1820 | 15,7788 |

Закінчення таблиці 4.1.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|----|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 30 | 60 | 1,2400 | | | | | 9,4540 | | |
| | | 1,0886 | 1,1129 | | | | 5,2439 | | |
| | | 1,0061 | | | | | 3,9689 | 18,7268 | |
| | | 1,2714 | | | | | 10,1187 | | |
| | | 1,0786 | 1,1292 | 1,1399 | 0,0215 | 3,2833 | 5,2439 | 19,8027 | 20,8816 |
| | | 1,0357 | | | | | 4,4401 | | |
| | | 1,3214 | | | | | 11,8160 | 23,8554 | |
| | | 1,1543 | 1,1932 | | | | 7, 0974 | | |
| | | 1,0743 | | | | | 5,0020 | | |

Застосування інших критеріїв оцінки зносу обмежено необхідністю оцінки кінетичних характеристик за допомогою величин, що визначають кількості речовини, тобто замінити V можна тільки на ваговий знос [5].

Статистична оцінка отриманих експериментальних даних, здійснена відповідно до розробленої експериментально-розрахункової методики оцінки кінетичних характеристик показує низьку в порівнянні з відомими експериментальними значеннями коефіцієнта варіації оцінки протизносних властивостей авіаційних палив $W = 4-5$, точність оцінки d_{cp} при $P=98,1$ Н и $T_2=333$ °K, коли $W = 9,39$ % та $W = 5,24$ %. Таке значне зменшення точності оцінки d_{cp} (у 2 рази), встановлене тільки при одному значенні P и T , обумовлені більшою нелінійністю кінетичних залежностей зношування і проявом дифузійного характеру статистичного розподілу реалізації кінетичного експерименту, на відміну від порівняльних дослідів авіаційних палив, тобто при постійних, значеннях P , $V_{ск}$, T , t , для яких і були встановлені значення $W=4-5$ % [1].

У даній роботі відповідно до запозиченої методики трибокінетичного експерименту й оцінки кінетичних характеристик, E^P розраховували за рівнянням Арреніуса (3.14), за трьома при $T_1=303$ °K та при $T_1=333$ °K значеннями констант швидкості досліджуваної стадії (процесу), розраховували за рівняннями хімічної кінетики, тобто E^P є кінетичним, фізико-хімічним критерієм оцінки зносостійкості матеріалів трибоспряжень.

Далі, відповідно до розробленої методики оцінки кінетичних характеристик досліджуваної стадії ТР, будували графіки залежності $\lg V_{шк}$ від t для кожного значення P и T (рисунок 4.1), при яких проводили трибокінетичні дослідів, вираховували $N \approx 1$. Лінійні залежності $V_{шк}$ від t підтвердили перший порядок стадії поверхневого руйнування (зношування) стали ШХ15 у паливі ТС-1 доготривалого зберігання для проведеного трибокінетичних дослідів, графічно встановили константи досліджуваних стадій K , чисельно рівні тангенсам кутів нахилу прямих до осі абсцис, дозволили розрахувати значення N^P і K^P за формулами (3.6) і (3.10) відповідно. Результати проведених

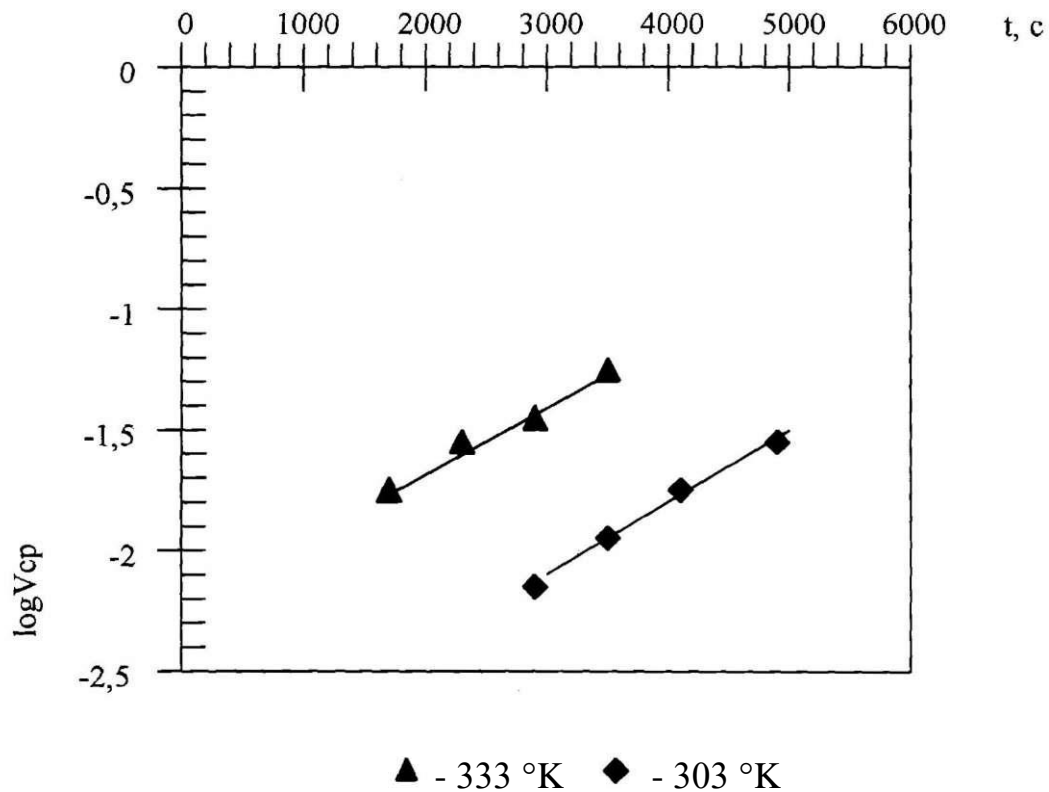


Рисунок 4.1 - Графіки залежності логарифма середнього значення трьох випробувань сумарного зносу трьох куль $\log V_{cp}$ від тривалості випробувань (t).

розрахунків, дані статистичної оцінки K^P (середні арифметичні значення K^P , довірчі інтервали оцінки K^P — ΔK^P коефіцієнти варіації експериментальної оцінки — W) і значення енергії активації поверхневого руйнування (зношування) E^P , яке розраховане за рівнянням Арреніуса (3.14) (таблиця 4.2), цілком підтвердили інваріантність і максимальність значень E^P у діапазоні СП стали ШХ15 у паливі ТС-1 доготривалого зберігання, що вказує на гарну адекватність і конструктивність використовуємої кінетичної моделі нормального механо-хімічного зношування. Розраховані на підставі встановлених кінетичних характеристик N і K значення коефіцієнта варіації оцінки K^P ($W_K = 10,2-6,7\%$) підтвердили кращу, у порівнянні зі звичайними трибологічними дослідями, адекватність і точність експериментально-розрахункової методики оцінки кінетичних характеристик.

Таблиця 4.2 - Кінетичні характеристики та енергія активації поверхневого руйнування E^P

| Значення | | | Інтервали часу Δt , для яких розраховували $\Delta t \times 10^{-3}$, с ⁻¹ | Значення K^P для інтервалів Δt , $K^P \times 10^{-3}$, с ⁻¹ | Середні значення K^P , $K^P \times 10^{-3}$, с ⁻¹ | Коефіцієнт варіації оцінки , K^P , W_K % | Значення енергії активації зносу, E^p , кДж/моль |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------|---|---|---|--|--|
| вісьового навантаження, Н | температури, Т, °К | порядка реакції зносу, | | | | | |
| 98,1 | 303 | 1 | 3,6-3 | 1,2094 | 1,0872 | 10,2 | 19,581 |
| | | 1 | 4,2-3,6 | 0,9927 | | | |
| | | 1 | 4,8-4,2 | 1,0595 | | | |
| | 333 | 1 | 2,4-1,8 | 1,9868 | 2,1899 | 6,7 | |
| | | 1 | 3-2,4 | 2,4038 | | | |
| | | 1 | 3,6-3 | 2,1791 | | | |

При цьому значення N^P розраховували більш простим, менш точним і трудомістким методом, розраховавши швидкість поверхневого руйнування \bar{W}^P за формулою (3.9) для початкового і кінцевого інтервалів Δt , тому що розрахунок N^P здійснювали для підтвердження першого порядку поверхневого руйнування і встановлення більш точних, аналітично розрахованих значень N^P .

4.2 Порівняння значень енергії активації поверхневого руйнування сталі ШХ 15 в паливах ТС-1 та ТС-1 довготривалого зберігання

Для більш точного порівняння значень енергії активації кондиційного палива ТС-1 та палива ТС-1 довготривалого зберігання були відібрані проби згідно ГОСТ 2517-85 та перевірена якість перерахованих палив у об'ємі повного аналізу. Результати аналізу палив, який проводили у лабораторії ПММ міжнародного аеропорту „Київ” представлені у таблиці 4.3.

Під час порівняння кондиційного палива ТС-1 та палива ТС-1 довготривалого зберігання виявлено:

Таблиця 4.3 – Результати аналізу палив

| Найменування показників | Норма за ДСТУ | Результати аналізу ТС-1 | Результати аналізу ТС-1 доготривалого зберігання |
|---|---|-------------------------|--|
| Щільність при 20°C, г/см ⁻¹ | Не менше за 0.775 | 0,787 | 0,788 |
| Температура початку перегонки, °C | Не нормується, але фіксується Визначення обов'язково | 135 | 146 |
| 10% відгоняється за температурою, °C | Не вище 175 | 148 | 158 |
| 50% відгоняється за температурою, °C | Не вище 225 | 176 | 190 |
| 90% відгоняється за температурою, °C | Не вище 270 | 218 | 220 |
| 98% відгоняється за температурою, °C | Не вище 280 | 223 | 236 |
| Кінематична в'язкість, сСт, при 20°C | Не менше за 1,25 | 1,30 | 1,49 |
| Кислотність, мг КОН на 100 мл пального | Від 0.2 до 0.7 | 0,26 | 0,46 |
| Температура вспалаху у зачиненому тиглі, °C | Не нижче 28 | 34 | 44 |
| Температура початку кристалізації, °C | Не вище -55 | -59 | -59 |
| Вміст фактичних смол на 100 мл пального, мг | Не більше за 5.0 | 1,5 | 2,8 |
| Вміст суми водорозчинних лужних сполук | Відсутність | Відсут. | Відсут. |
| Вміст водорозчинних кислот | Відсутність | Відсут. | Відсут. |
| Вміст механічних домішок та води | Відсутність | Відсут. | Відсут. |
| Вміст рідини І-М в пальному | | - | - |

- відмінність у кольорі (прозорий — кондиційне паливо ТС-1, жовтий — палива ТС-1 довготривалого зберігання);
- відмінність у фракційному складі (не на багато вищі температури перегонки визначених фракцій у палива ТС-1 довготривалого зберігання ніж у кондиційного палива ТС-1);
- відмінність у кислотності (більший вміст вуглеводневих кислот у палива ТС-1 довготривалого зберігання ніж у кондиційного палива ТС-1);
- відмінність у температурі спалаху (менша кількість летючих сполук у палива ТС-1 довготривалого зберігання ніж у кондиційного палива ТС-1);
- щільність у палива ТС-1 довготривалого зберігання та у кондиційного палива ТС-1 майже однакова;
- різниця у кінематичній в'язкості у палива ТС-1 довготривалого зберігання та у кондиційного палива ТС-1 викликана обтяженням фракційного складу.

Головна відмінність у фізичних властивостях палив ТС-1 і ТС-1 довготривалого зберігання полягає у відмінності забарвлення, більшій кількості фактичних смол, вуглеводневих кислот, більш важчому фракційному складу у ТС-1 довготривалого зберігання.

Висновки до розділу 4

Зважаючи на отримані результати та дані попередніх досліджень можна зробити наступні висновки:

- в черговий раз підтвердилася інваріантність енергії активації поверхневого руйнування (тобто зносу металу) E^P в діапазоні структурної пристосовуваності матеріалів пар тертя, тобто в діапазоні нормального механо-хімічного зносу;
- незначне переважання $E^P=19,58$ в порівнянні $E^P=19,42$ палива ТС-1 довготривалого зберігання над паливом ТС-1 вказує на кращі властивості палива довготривалого зберігання. Але незначне підвищення E^P палива ТС-1 довготривалого зберігання не дозволяє однозначно стверджувати про це, так як дуже близькі значення E^P можуть бути розташовані у довірчому інтервалі одного з вказаних значень E^P . Тому для підтвердження або спростування цього твердження необхідно проводити оцінку E^P при третій температурі з метою визначення довірчого інтервалу. Але вже зараз можна зробити висновок, що ТС-1 довготривалого зберігання за фізико-хімічними властивостями майже не поступається ТС-1 „свіжому” виготовленому в вересні минулого року.
- порівнюючи значення $E^P=19,42$ і $E^P=19,58$ палива ТС-1 і палива ТС-1 довготривалого зберігання з отриманим раніше значенням $E^P=21,017$ палива РТ можна зробити висновок, що паливо РТ за протизносними властивостями переважає паливо ТС-1 і паливо ТС-1 довготривалого зберігання.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Законодавча та нормативна база України про охорону праці

Законодавчими актами, які визначають основні положення про охорону праці, є загальні закони України, а також спеціальні законодавчі актами. Загальними законами України, що визначають, основне положення з охорони праці є Конституція України, Закон України «Про охорону праці», Кодекс законів про працю (КЗпП), Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності.

Стаття 43 Конституції України визначає, що кожен має право на працю. Держава створює умови для повного здійснення громадянами права на працю, гарантує рівні можливості у виборі професії та роду трудової діяльності. Кожен має право на безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату не нижчу від визначеної законом. Використання праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для їхнього здоров'я роботах забороняється. Громадянам гарантується захист від незаконного звільнення. Право на своєчасне одержання винагороди за працю захищається законом.

Кодекс законів про працю України регулює трудові відносини всіх працівників (далі-об'єкти), сприяючи зростанню продуктивності праці, поліпшенню якості роботи, підвищенню ефективності суспільного виробництва і піднесенню на цій основі матеріального і культурного рівня життя трудящих. Згідно статті 141 власник (далі-суб'єкт) або уповноважений ним орган повинен правильно організувати працю працівників, створювати умови для зростання продуктивності праці, забезпечувати трудову і виробничу дисципліну, неухильно додержуватися законодавства про працю і правил охорони праці, уважно ставитися до потреб і запитів працівників, поліпшувати умови їх праці та побуту.

На суб'єкт або уповноваженого ним орган покладається систематичне проведення інструктажу (навчання) працівників з питань охорони праці, протипожежної охорони.

Суб'єкт зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці.

Суб'єкт несе безпосередню відповідальність за порушення зазначених вимог.

До найважливіших підзаконних нормативно-правових актів з питань охорони праці належать:

- положення про видачу спеціальним уповноваженим центральним органом виконавчої влади з нагляду за охороною праці роботодавцеві дозволу на початок роботи підприємства, установи, організації;
- положення про розслідування та облік нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на підприємствах, в установах і організаціях;
- правила відшкодування роботодавцем заподіяного працівникові ушкодження здоров'я, пов'язаного з виконанням ним трудових обов'язків;
- положення про порядок накладання штрафів на підприємства, установи і організації за порушення нормативних актів про охорону праці;
- список важких робіт та робіт із шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці жінок;
- граничні норми підймання і переміщення важких речей жінками;
- список виробництв, професій і робіт з важкими і шкідливими умовами праці;
- граничні норми підймання і переміщення важких речей неповнолітніми;

- перелік робіт з підвищеною небезпекою;
- типові положення про навчання, інструктаж і перевірку знань працівників з питань охорони праці;
- перелік посад посадових осіб, які зобов'язані проходити попередню і періодичну перевірку знань з охорони праці;
- типові положення про службу охорони праці;
- типові положення про комісію з питань охорони праці підприємства;
- типові положення про роботу уповноважених трудових колективів з питань охорони праці.

Нормативна документація з питань охорони праці в Україні включає:

- державні нормативні акти про охорону праці, міжгалузеві та галузеві;
- систему стандартів безпеки праці — державні стандарти України (ДСТУ).
- міждержавні стандарти безпеки праці та міждержавні міжгалузеві та галузеві нормативні акти.

5.2 Небезпечні та шкідливі виробничі чинники, що діють при технічному обслуговуванні паливної системи літака

Вимоги безпеки при технічному обслуговуванні паливної системи літака повинні дотримуватися відповідно до правил «Безпеки праці при технічному обслуговуванні і поточному ремонті авіаційної техніки» (ДНАОП 5.1.30 - 1.06 - 98, ГОСТ 12.0.003 -74 ССБТ).

При технічному обслуговуванні паливної системи літака можуть виникати наступні небезпечні чинники [37]:

- підвищена запиленість і загазованість повітря в зоні технічного обслуговування;
- літаки, що рухаються, спеціальний автотранспорт і самохідні механізми;
- витікаючі струмені газів і рідин із судин і трубопроводів, що працюють під тиском;

- підвищена чи знижена температура поверхонь авіаційної техніки, устаткування і матеріалів;
- підвищений рівень шуму, вібрації,
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена чи знижена температура, вологість і рухливість повітря в зоні технічного обслуговування літаків;
- гострі краї, задирки і шорсткість на поверхнях літаків, устаткування і інструмента;
- відсутність чи недостатність природного освітлення;
- ударна хвиля (вибух судин, що працюють під тиском, парів пальної рідини);
- падаючі вироби авіаційної техніки, інструмент і матеріали при роботах по технічному обслуговуванню літаків на площинах, стабілізаторі, фюзеляжі і при роботах на висоті з застосуванням механізованих підйомників;
- конструкції, що руйнуються, (бортові сходи, драбини і інше виробниче устаткування);
- високо розташовані частини літака;
- підвищене ковзання (внаслідок зледеніння, зволоження і замащення поверхонь літаків, трапів, драбин, приставних сходів і покриттів місць стоянок, по яких рухається обслуговуючий персонал);
- підвищений рівень статичної електрики;
- хімічні речовини (токсичні, що подразнюють, що впливають на репродуктивну функцію і ін.), які входять до складу паливно-мастильних матеріалів (ПММ), спецрідини і ядохімікати, застосовувані матеріали, що проникають в організм крізь органи подиху, шлунково-кишковий тракт, шкірні покриви і слизоваті оболонки.

Для робочих, що знаходяться в приміщеннях, рівень шуму не повинний перевищувати 50 дБ. Для робочих, що знаходяться на виробничій території

аеропорту, у тому числі на місцях стоянок літаків, пероні, рівень шуму не повинний перевищувати 85дБ згідно «Правила безпеки праці при технічному обслуговуванні і потоковому ремонті авіаційної техніки»:

- підвищений рівень вологості $> 70\%$;
- знижений рівень вологості $< 30\%$;
- розташування робочих місць на висоті 1м щодо поверхні землі (при обслуговуванні двигунів, паливних кесонів).

5.3 Технічні та організаційні заходи для зменшення рівня впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Відповідно до (ДНАОП 5.1.30 - 1.06-98, ГОСТ 12.0.003.-74 ССБТ) пропонуються заходи, спрямовані на зниження небезпечних і шкідливих виробничих чинників, що виникають при різних формах технічного обслуговування системи літака.

Для запобігання чи зменшення впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників згідно «Інструкції правил безпеки праці при технічному обслуговуванні і поточному ремонті авіаційної техніки» розроблено наступні заходи:

- проведення інструктажу водіїв спец. транспорту з основними правилами руху і під'їзду до повітряного судна;
- швидкість руху спец. транспорту і самохідних засобів механізації на місцях стоянок і по пероні повинна бути не більш 20 км/год. При під'їзді до обслуговуваного літака, не доїжджаючи до нього 10 м водій зобов'язаний зупинити машину і почати під'їзд зі швидкістю не більш 5 км/год під керівництвом посадової особи, відповідального на даний час за літак;
- для маневрування спец. транспорту існують одnobічні проїзди завширшки 3,5 м;
- для зменшення запиленості робочої зони на відкритій місцевості передбачене використання спецмашин, що очищають ґрунт за

допомогою сильного струменя води, у закритих приміщеннях використання природної і примусової вентиляції;

- на пероні, в ангарі встановлені джерела штучного освітлення;
- застосовуються переносні електричні лампи з напругою 28 В;
- при роботі на кесонах-баках використовуються переносні вибухобезпечні лампи напругою 28 В;
- для зняття статичної електрики в ангарі і на стоянці літаків встановлено колодязі, для заземлення літаків;
- з метою зменшення впливу шуму від працюючих двигунів при необхідності перевірки герметичності паливної системи передбачене застосування проти шумних навушників;
- з метою зменшення токсичних парів палива ($\text{ПДК} = 300 \text{ мг/м}^3$) при роботі в паливних баках-кесонах передбачене обов'язкове використання засобів індивідуального захисту органів дихання;
- при роботах, що пов'язані з відкритими обсягами палива, для захисту відкритих частин тіла застосовуються спеціальні силікатні мазі;
- при роботі на високо розташованих частинах силової установки інструменти і устаткування розташовується на драбинах у сортовиках, щоб виключити їхнє падіння і травмування обслуговуючого персоналу;
- для усунення підвищеного забруднення місця стоянок періодично очищаються від бруду, льоду, снігу, а також передбачене використання спеціального розробленого взуття;
- у системі вентиляції ангара використовується циркуляція теплого сухого повітря в зимовий час.

Для створення здорової обстановки на ділянці технічного обслуговування паливної системи в робоче приміщення надходить свіже повітря.

5.4 Забезпечення пожежної і вибухової безпеки в ангари

Відповідно з ГОСТ 12.1.004-91 джерелами ініціювання пожежі є:

- електричні розряди при роботі з ручним електроінструментом, а також джерела освітлення робочої зони;
- іскри від ударів ручного інструменту при виконанні операцій технічного процесу стикування вузлів і агрегатів;
- ударні хвилі у разі вибуху компресорних станцій, повітропроводів;
- вибух парів гасу при змивальних роботах. Імовірність виникнення пожежі від одиничного технічного виробу чи обладнання при їхній розробці і виготовленні не повинні перевищувати значення 10^{-6} на рік.

Відповідно до вимог ГОСТ 12.1.004-91 організаційно-технічні заходи щодо забезпечення пожежної та вибухової безпеки включають:

- необхідність постановки плавких запобіжників в лічильниках електроенергії, для стабілізації напруги в мережу живлення електроприладів повинні включатися стабілізатори напруги;
- застосування на інструментах засобів захисту від іскор, використання такого інструменту, який виготовлений з безіскрових матеріалів або у відповідному пожежобезпечному виконанні;
- додаткове огороження ділянки виконання техпроцесу;
- дотримання персоналом істановлених правил при роботі з пожежо- та вибухонебезпечними речовинами;
- установлення на обладнанні, що може вибухнути або загоріти, знаків, які забороняють користуватися відкритим полум'ям;
- потрібно не допускати виконання виробничих операцій на несправному обладнанні, адже це може призвести до спалахування та пожеж, а також при відключених контрольно-вимірювальних приладах, за якими визначаються технологічні параметри (температура, тиск та інше);
- доставка легкоспалахуючих та горючих рідин у невеликій кількості в безпечній негорючій тарі;

- для миття й знежирення обладнання, виробів, деталей застосовуються негорючі миючі засоби та спеціальні методи очищення;
- профілактичний огляд, планово-попереджувальний та капітальний ремонт технологічного обладнання з врахуванням виконання заходів по забезпеченню пожежовибухобезпеки;
- встановлення компресорних станцій у спеціально відведених місцях (камерах з посиленими стінами і стелями для захисту суміжних приміщень у випадку вибуху, періодичне технічне обслуговування й контроль параметрів роботи);
- застосування спеціальних підпільних оболонок для повітроводів і періодична перевірка кранів і штуцерів на наявність витoku повітря;
- роботи по очищенню витяжних пристроїв повинні проводитися систематично та фіксуватися в журналі;
- суворе дотримання правил пожежної безпеки при роботі з гасом і іншими вогнебезпечними речовинами, застосування потужної вентиляції, обладнання робочих місць шухлядами з піском, припинення усіх видів інструментальних робіт там, де ведуться змивні роботи.

Ще при проектуванні та будівництві необхідно враховувати, що цех відноситься до категорії А (за ступенем застосування вогнестійких матеріалів). У цеху необхідно встановити жорсткий протипожежний контроль, підвищити вимогливість щодо дотримання правил протипожежної безпеки з боку адміністрації, головного механіка та енергетика. Необхідно забезпечити безпечний виїзд літаків з цеху, для чого передбачають широкі ворота. Ці ворота повинні бути змащені, канавки чисті, під'їзд до воріт повинен бути вільним.

Для запобігання статичної електрики передбачено заземлення. При використанні місцевого освітлення використовують напругу 36 В. Для збирання промасленого ганчір'я застосовуються спеціальні шухляди, які прибираються наприкінці робочого дня.

У ангарі заборонено:

- застосування відкритого вогню без спеціального дозволу пожежної охорони;
- збереження сигнальних ракет, ПММ і кислот у не встановлених для цього місцях;
- робити зборку, пайку за межами спеціальних місць.

Для того, щоб забезпечити гасіння пожежі на початковій стадії, передбачено два пожежних крана, приєднаних до господарсько – виробничого трубопроводу. Довжина кожного шлангу 15м, продуктивність – 2,5 л/с. Зі стаціонарних вогнегасників необхідно мати двобалонний вогнегасник УП – 2М. Для повідомлення про пожежу в зручних місцях необхідно встановити два телефонних апарата. Для попередження про пожежу у відсутності людей, необхідно встановити автоматичну систему електричної пожежної сигналізації. Як прийомну станцію електричної пожежної системи, використовується система – станція СДПУ – 1 з оповіщувачем.

5.5 Розрахунок заземлення установки для перевірки герметичності баків-кесонів

При розрахунку заземлення необхідно визначити число вертикальних заземлень і довжину сполучної смуги. За даними розрахунків величина опору заземлення не повинна перевищувати величини встановленої «правилами будови електричних установок».

Величина опору заземлення визначається за формулою (5.1):

$$R_0 = \frac{0.366}{l} \cdot \rho \left[\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4h+l}{4h-l} \right], \quad (5.1)$$

де l - довжина труби, см;

d - зовнішній діаметр труби, см;

h - відстань від середини труби до поверхні землі, см;

ρ - питомий опір.

Приймаємо: $l = 120\text{см}$; $d = 3,0\text{см}$; $h = 110\text{см}$; $\rho = 1 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Підставляємо вище вказані значення до формули (5.1) та отримуємо:

$$R_0 = \frac{0.366}{120} \cdot 10^4 \left[\lg \frac{2 \cdot 120}{3} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 110 + 120}{4 \cdot 110 - 120} \right] = 30 \quad \text{Ом.}$$

Кількість одиночних заземлень розраховуємо за формулою (5.2):

$$n = \frac{R_0}{r_n \cdot \eta}, \quad (5.2)$$

де r_n - визначає опір заземлення. Приймаємо нормативний опір заземлюючого простору $r_n=4\text{Ом.}$ (для установки вище 1000 В.)

η - коефіцієнт використання одиночного заземлення. Приймаємо $\eta=0,6$

Підставляємо вище вказані значення до формули (5.2) та отримуємо:

$$n = \frac{30}{4 \cdot 0,6} = 12,5$$

Приймаємо $n=12$ штук.

Опір смуги, яка з'єднує поодинокі заземлення, визначаємо за формулою (5.3):

$$R_H = \frac{0.366 \cdot \rho}{\eta_n \cdot \ln} \cdot \lg \frac{2 \cdot l \cdot n^2}{b \cdot h_n}, \quad (5.3)$$

де l_n – довжина смуги, см, яка розраховується за формулою (4.4);

b – ширина смуги, $b=3$ см;

η_n – коефіцієнт використання смуги, $\eta_n=0,6$;

h_n – глибина заземлення полоси, $h_n=70$ см.

$$l_n = a \cdot n, \quad (5.4)$$

де, a – дистанція між поодинокими заземленнями

$$l_n = 240 \cdot 12 = 2880 \quad \text{см}$$

Підставляємо вище вказані значення до формули (5.3) та отримуємо:

$$R_H = \frac{0.366 \cdot 10^4}{0,6 \cdot 2880} \cdot \lg \frac{2 \cdot 120 \cdot 12^2}{3 \cdot 70} = 4,52 \quad \text{Ом}$$

Загальний опір заземлення визначаємо за формулою (5.5):

$$R_3 = \frac{R_0 \cdot R_n}{R_0 \cdot \eta_n + n \cdot R_n \cdot \eta_n}, \quad (5.5)$$

$$R_3 = \frac{30 \cdot 4.52}{30 \cdot 0.6 + 12 \cdot 4.52 \cdot 0.6} = 2.61$$

Результати розрахунків показують, що заземлення відповідає умові (5.6) та вимогам «Правил будови електричних установок», т.п

$$R_3 < r_n; \quad (5.6)$$

$$2,61 < 4 \text{ Ом.}$$

Тобто, отримані параметри використовуємо для заземлення даної установки

5.6 Інструкція з охорони праці при технічному обслуговуванні паливної системи літака

Для забезпечення безпеки роботи людей при обслуговуванні літака необхідно дотримуватись наступних правил:

1. Осіб, що не пройшли інструктаж з техніки безпеки, пожежної і вибухової безпеки з розписом у журналі до роботи допускати забороняється;
2. Стоянки повітряних суден повинні бути обладнані надійними заземлюючими пристроями;
3. Відстань між повітряними суднами в одному ряді повинне відповідати вимогам;
4. Під час роботи не допускати перегріву та перевантаження електричних систем, обладнання та агрегатів;
5. Під час робіт у зонах підвищеної пожежонебезпечності використовувати безіскровий інструмент;
6. Територію аеродромів, місць стоянок літальних апаратів, приміщень авіаційно-технічних центрів (АТЦ) необхідно захищати від сміття, промасленого ганчір'я, сухої трави й інших займистих речовин і матеріалів;

7. Після зняття апаратури і агрегатів, штепсельні роз'єми необхідно закривати заглушками, а відкриті кінці електропроводів – ізолювати;
8. Стан електромереж АТЦ повинен перевірятися не рідше двох разів на рік;
9. Виконувати роботи з фарбування, мийки та промивання двигунів необхідно лише в обладнаних для цього приміщеннях;
10. Перед заправленням повітряних суден паливом необхідно зняти статичну електрику з заливних горловин;
11. Під час заправлення відкритим способом не допускати переливання палива на землю;
12. Всі вогнегасники повинні дотримуватись в працездатному стані та зберігатись на відведених для цього місцях;
13. Під час робіт з обслуговування ПС на відкритих площадках та в приміщеннях забороняється:
 - 13.1. Паління та використання відкритого вогню ближче 25 м від ПС та виробничих приміщень, інших пожеже небезпечних приміщень;
 - 13.2. Починати роботи, не перевіривши заземлення повітряного судна, наявність та справність засобів пожежегасіння;
 - 13.3. Допускати до повітряного судна спецмашини, що не мають передбачених для них засобів пожежегасіння, заземлення та іскрогасіння;
 - 13.4. Використовувати під час роботи несправні електронагрівальні та електроосвітлювальні прилади;
 - 13.5. Виконувати роботи з фарбування, мийки та промивання двигунів в необладнаних для цього приміщеннях;
 - 13.6. Протягом 3 годин після закінчення фарблених робіт виконання робіт, що супроводжуються виникненням іскор;
 - 13.7. Запуск авіадвигунів при наявності розлитого палива;
 - 13.8. Зберігати ємності з горючими матеріалами, розпалювати паяльні лампи, вогнища, спалювати сміття та траву на відстані від повітряного судна та виробничих приміщень ближче, ніж це встановлено правилами;

- 13.9. При заправленні повітряного судна паливом виконувати роботи з ремонту і перевірки радіо й електроустаткування з включенням бортової мережі, заміну акумуляторів, підігрівання авіадвигунів, приєднання джерел електроенергії;
- 13.10. Зберігати в ангарах, доках легкозаймисті і горючі рідини, сигнальні ракети, балони з киснем, промаслене дрантя, автотранспортні засоби;
- 13.11. Промивати і очищувати предмети побутового обладнання, частини і деталі ПС вогнебезпечними матеріалами;
- 13.12. Зливати нафтопродукти на ґрунт, злітно-посадкові смуги, руліжні доріжки або в непристосовану тару;
- 13.13. Під час роботи в приміщенні розташовувати електричні проводи на шляхах руху внутрішньоангарного транспорту;
- 13.14. Загромаджувати шляхи виводу ПС (обладнання) з приміщення;
- 13.15. Використовувати пожежний інвентар з метою, що не пов'язана з гасінням пожежі. Під час виникнення пожежі необхідно доповісти про це черговому пожежної охорони авіапідприємства, начальнику цеху, зміни, бригадиру та приступити до гасіння пожежі згідно з позаштатним пожежним розкладом.

Висновки до розділу 5

У цій частині дипломної роботи виконано наступне:

- розглянуто визначення та класифікацію виробничих шкідливих чинників, їх вплив на організм працівників, а також наведені основні шляхи захисту людини від них.
- проведено розрахунок заземлення установки для технічного обслуговування паливної системи літака.

На основі виконаного робимо наступні висновки:

- як показує практика, там, де питанням охорони праці і техніки безпеки приділяється належна увага, продуктивність праці значно вища, менші людські втрати, кращий стан здоров'я працівників, здоровий психологічний клімат у колективі і, як підсумок, високий прибуток.

6 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

6.1 Аналіз факторів забруднення навколишнього середовища внаслідок експлуатації повітряних суден

Запобігання шкідливому впливу всіх видів транспорту на навколишнє природне середовище є одним із найголовніших завдань природоохоронної діяльності держави. Основні правові норми, які закріплюють правові заходи по охороні навколишнього природного середовища від шкідливого впливу транспорту, містяться в Законах України від 26 червня 1991 року «Про охорону навколишнього природного середовища», від 16 жовтня 1992 року «Про охорону атмосферного повітря» та від 10 листопада 1994 року «Про транспорт». Крім того, щодо окремих видів транспорту є спеціальні нормативні акти, які також закріплюють правові заходи екологічної безпеки транспортних засобів. Так, у Повітряному кодексі України передбачається, що суб'єкти авіаційної діяльності зобов'язані під час експлуатації повітряних суден на землі та в повітрі дотримуватися встановлених нормативів вмісту забруднюючих речовин у відпрацьованих газах та впливу фізичних факторів і вживати заходів щодо зменшення обсягів викидів (емісії) забруднюючих речовин.

В процесі виконання операцій з технічного обслуговування повітряного судна, а саме технічного обслуговування паливної системи літака відбувається забруднення навколишнього середовища в результаті потрапляння до стічних вод паливно-мастильних матеріалів (ПММ).

Змиті забруднення потрапляють до колектору аеродрому для збирання стічних вод, стічні води якої при недостатньому їх очищенні можуть стати причиною забруднення поверхневих або підземних вод та ґрунтів різними шкідливими речовинами. Забруднення разом з залишки ПММ є найбільш небезпечними хімічними забруднювачами. Вони негативно впливають на велику кількість живих організмів та шкідливо діють на всі ланки біологічного ланцюгу. Значних екологічних збитків завдають плівки нафтопродуктів, що утворюються на поверхні водоймищ. 1 м³ пально-мастильних матеріалів

покриває до 13,5 тисяч м² водної гладі. Міністерством охорони здоров'я та Міністерством рибного господарства України були встановлені такі гранично допустимі концентрації нафти та нафтопродуктів в водах природних водоймищ: для водоймищ господарчо-питного та культурно-побутового водовикористання – 0,3 мг/л; для водоймищ рибогосподарського призначення – 0,05 мг/л.

Пари вуглеводнів, зокрема нафтопродуктів і продуктів їх згорання, можуть викликати серйозні захворювання органів дихання, зору, серцево-судинної системи людини.

6.2 Рекомендації щодо обмеження негативного впливу забруднень та при проведенні робіт з технічного обслуговування повітряних суден

При проведенні робіт з технічного обслуговування паливної системи літака основними джерелами забруднення навколишнього середовища є:

- шуми, створені працюючим устаткуванням цеху;
- забруднення ґрунтів, водоймищ у результаті потрапляння ПММ до стічних вод внаслідок розливу та витoku при втраті герметичності паливної системи літака;
- забруднення атмосферного повітря шкідливим випаровуванням ПММ.

6.2.1 Заходи щодо обмеження негативного впливу на стічні води, розрахунок нафтопастки та визначення її ефективності

Для очищення стічних вод можна запропонувати наступні методи:

- механічні методи для усунення зважених часток із стічних вод (освітлення стічних вод), відстоювання в гравітаційному полі (у відстійниках) і в полі центробіжних сил (у гідроциклонах), проціджування, флотація і фільтрування;
- хімічні методи, коли виділення забруднювачів можливо тільки в результаті хімічних реакцій між забруднювачами і реагентами, що вводяться, з утворенням нових речовин, які легко видалити із стічних

- вод. Для цього застосовують нейтралізацію, коагуляцію і флокуляцію;
- фізико-хімічні методи, які вимагають застосування реагенту і засновані на зміні фізичного стану забруднювачів, які полегшують їх видалення із стоків. До них відносяться флотація, віддувка, електрохімічні методи;
 - біохімічні методи засновані на здатності деяких мікроорганізмів руйнувати органічні та деякі неорганічні сполуки (наприклад, сульфідів і солі амонію), перетворюючи їх на нешкідливі продукти окислення: воду, двоокис вуглецю, нітрат, сульфатіони та ін.;
 - термічні методи, які полягають у повному окисленні при високій температурі (при згоранні) забруднюючих речовин з отриманням нетоксичних продуктів згорання і твердого залишку. Можливі різні варіанти застосування термічного методу, починаючи від повного знищення стоків з найбільшою кількістю твердого залишку і до значного зменшення (випаровування) їх, після чого концентровані розчини можна захоронити у відвалах, або використовувати для отримання цінних продуктів).

За ефективністю очищення вод від нафтопродуктів (характеризується вмістом нафтопродуктів в воді) в напрямку зростання очисні споруди розміщуються в такій послідовності:

- нафтопастка (50...100 мг/л);
- флотаційна установка (15...30 мг/л);
- ставок-відстійник (15....20 мг/л);
- станція біологічного очищення (5...10 мг/л);
- установка озонування з двома ступенями (1...3 мг/л).

Для попередження потрапляння забруднень та мийних сумішей разом з нафтопродуктами до ґрунту та водні джерела при експлуатації очисних споруд виконують ряд заходів:

- організовують режим роботи очисних споруд з забезпеченням розрахункового режиму очищення стічних вод;

- проводять плановий та поточний ремонт очисних споруд, систематично контролюють їх роботу, своєчасно звільнюють очисні споруди від затриманих нафтопродуктів та опадів;
- утилізують продукти очищення.

Територія зливних зон повинна мати ухили для відведення стоків у відвідні лотки, труби або канави, з'єднанні через гідравлічні затвори з нафтопродуктами, що є засобами попереднього очищення.

Нафтопастки служать для очищення стічних вод від основної маси плаваючих та емульсованих нафтопродуктів, а також для осаджування механічних домішок.

До складу очисних споруд підприємства які призначені для очищення стічних вод входить нафтопастка. Нафтопастки – це очисні системи, головне призначення яких – очищення виробничих стоків від механічних домішок і нафтопродуктів. Принцип роботи таких автономних споруд заснований на використанні гравітаційних сил, тобто стічні води очищаються шляхом відстоювання.

Сьогодні розрізняють кілька основних типів нафтопасток:

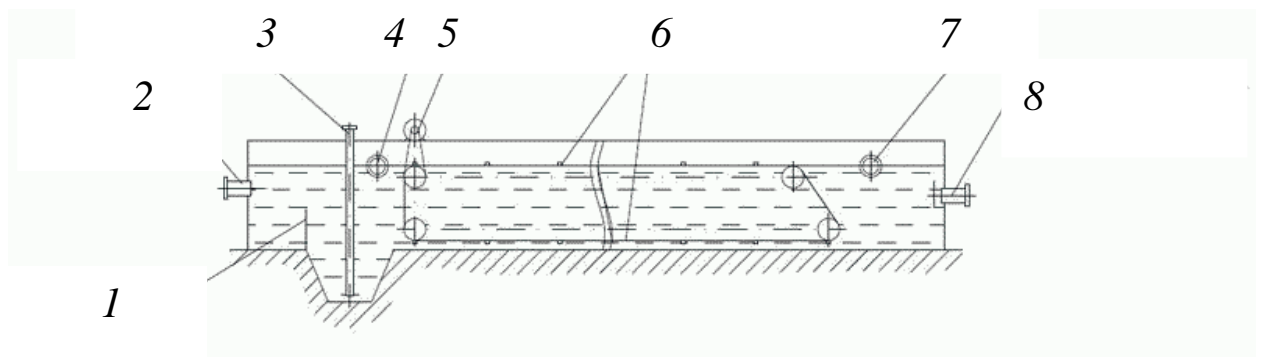
- горизонтальні;
- радіальні;
- багатоярусні (тонкошарові).

Розглянемо роботу горизонтальні нафтопастки. Горизонтальні нафтопастки це великі резервуари-відстійники з паралельно розташованими секціями, які утворені перегородками. З розподільної камери, розташованої окремо, стічні води, що містять нафтопродукти, рухаючись по трубопроводах, просочуються через щілини в перегородках в кожену секцію нафтопастки. Очищені від нафтопродуктів води рухаються до кінця секції під затопленою стінкою, яка утримує нафту, і, пройшовши через водозлив, потрапляють в спеціальний відвідний лоток, а звідти вже в трубопровід. У зимовий період поверхню рідини обігривається за допомогою змійовика, це робиться для зменшення в'язкості нафти.

Скребковий транспортер, у міру накопичення нафти на поверхні, зганяє її до щільним поворотним трубах, через які вона і видаляється з нафтопастки. Той же транспортер прибирає і осад, що випадає на дно відстійника, згрібаючи його до приямку. Звідти відстій через мулопроводі періодично виводять за допомогою донних клапанів або ж гідроелеваторів.

Оцінка токсичності й небезпеки шкідливих речовин здійснюється за рядом показників, серед яких найбільш значимими є такі:

- середня смертельна концентрація в повітрі;
- поріг хронічної дії шкідливої речовини;
- гранично допустима концентрація;
- гранично допустима площа забруднення шкірного покриву;
- орієнтовно безпечний рівень впливу.



1-розподільча перегородка, 2-подача стічних вод, 3-відвід осаду,
4-нафтозбір, 5-привід транспортеру, 6-транспортер зі скребками,
7-нафтозбір, 8-відвід освітлених стічних вод

Рисунок 6.1 - Нафтопастка горизонтальна

Проведемо розрахунок нафтопастки для визначення її пропускної здатності та перевірки доцільності її використання.

Вихідні дані для розрахунку:

- середня витрата стічних вод, $Q_{cp} = 2550 \text{ м}^3/\text{доб}$;
- годинний коефіцієнт потоку стічних вод, $K_{год} = 1,3$;
- діаметр нафтових часток, $d = 90 \text{ мкм}$;

- температура стічних вод, $t_e = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- густина «ТС-1» при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\rho_n = 870\text{ кг/м}^3$;
- концентрація часток «ТС-1» у стічних водах, $C_n = 400\text{ мг/л}$
- концентрація металевих часток у стічних водах, $C_{мч} = 600\text{ мг/л}$;
- тривалість відстоювання, $T = 2,5\text{ год.}$

За формулою (6.1) визначаємо швидкість підймання нафтових частинок:

$$U_0 = \beta(112 - 93\rho_n \cdot 10^{-3}) \cdot 10^{0,0143 \cdot d}, \quad (6.1)$$

де β - коефіцієнт, що враховує вплив механічних домішок на швидкість підймання нафтових частинок і визначається за формулою (6.2):

$$\beta = 0,015 \frac{C_n}{C_{мч}} + 0,875; \quad (6.2)$$

$$\beta = 0,015 \frac{400}{600} + 0,875 = 0,885.$$

$$U_0 = 0,885(112 - 93 \cdot 870 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^{0,0143 \cdot 90} = 532,8 \cdot 10^{-6}\text{ м/с.}$$

За формулою (5.3) визначаємо довжину нафтопастки:

$$L = \frac{h_p W}{K_n(U_0 - W_B)} \quad (6.3)$$

де $W = 5\text{ мм/с}$ – середнє значення потоку;

$W_B = 0$ (при значенні $W = 5\text{ мм/с}$);

$h_p = 1,5\text{ м}$ – висота нафтопастки;

$K_n = 0,5$ – коефіцієнт використання об'єму, що враховує наявність зон циркуляції і мертвих зон, які практично не беруть участь в процесі очищення.

$$L = \frac{1,5 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{0,5(532,8 \cdot 10^{-6} - 0)} = 28,15\text{ м.}$$

За формулою (5.4) визначаємо максимальну секундну витрату:

$$Q = \frac{Q_{\text{ср}} \cdot K_{\text{год}}}{24 \cdot 3600}, \quad (6.4)$$

$$Q = \frac{2550 \cdot 1,3}{24 \cdot 3600} = 0,038\text{ м}^3/\text{с.}$$

За формулою (5.5) визначаємо ширину нафтопастки:

$$B = \frac{Q}{Wh_p N}, \quad (6.5)$$

де, N – кількість секцій нафтопастки. Приймаємо $N=2$.

$$B = \frac{0,038}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 2} = 2,53 \text{ м.}$$

Приймаємо $B=3$.

За проведеними розрахунками обираємо типову нафтопастку проекту 902-2-161 (розробник «Гидротрубопровод»). Технічні характеристики нафтопастки наведено у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - Технічні характеристики нафтопастки проекту 902-2-161

| Глибина проточної частини, м | Будівельні розміри секцій, м | | | Кількість секцій | Пропускна здатність, м ³ /год |
|------------------------------------|------------------------------|---------|--------|---------------------|--|
| | ширина | довжина | висота | | |
| 2 | 3 | 30 | 2 | 2 | 162 |

За формулою (6.6) визначимо швидкість потоку:

$$W = \frac{L}{T}; \quad (6.6)$$

$$W = \frac{30}{2,5 \cdot 3600} = 3,33 \cdot 10^{-3} \text{ м/с} = 3,33 \text{ мм/с.}$$

Продуктивність одної секції нафтопастки визначаємо за формулою (6.7):

$$Q_c = h_p B W; \quad (6.7)$$

$$Q_c = 2 \cdot 3 \cdot 3,33 \cdot 10^{-3} = 19,98 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

Пропускную здатність нафтопастки визначаємо за формулою (6.8):

$$Q = Q_c \cdot N; \quad (6.8)$$

$$Q = 19,98 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 39,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с} = 143,85 \text{ м}^3/\text{год}$$

Визначаємо швидкість підймання нафтових часток за формулою (6.9):

$$U_0 = \frac{W \cdot h_p}{L \cdot K_H}; \quad (6.9)$$

$$U_0 = \frac{3,33 \cdot 10^{-3} \cdot 2}{30 \cdot 0,5} = 0,444 \cdot 10^{-3} \text{ м/с} = 0,444 \text{ мм/с}$$

Визначаємо передбачуваний мінімальний діаметр нафтових частинок, які можуть бути виділені в нафтопасці за даних конкретних умов за формулою (6.10):

$$d = 69,93Lg \left[\frac{U_0}{\beta(112 - 93 \cdot \rho_n)} \right]; \quad (6.10)$$

$$d = 69,93Lg \left[\frac{444}{0,885 \cdot (112 - 93 \cdot 0,87)} \right] = 84,46 \text{ мкм.}$$

Отриманий діаметр частинок знаходиться в межах значень (80-100мкм), на які зазвичай розраховуються нафтопастки. Отже, в даній ситуації нафтопастка буде використовуватися раціонально. Залишкова концентрація нафтових часток у воді, що пройшла через нафтопастку, визначається лабораторним аналізом, відібраної проби.

Припустимо, що залишкову концентрацію нафти визначено у лабораторії і вона становить $C_k = 100$ мг/л. Тоді ефект виділення нафти визначають за формулою (6.11):

$$E = \frac{C_n - C_k}{C_n}; \quad (6.11)$$

$$E = \frac{400 - 100}{400} = 0,75 \text{ або } 75\%.$$

Кількість нафтопродуктів яку видаляє нафтопастка в тоннах за добу визначається за формулою (6.12):

$$M_n = C_n \cdot E \cdot Q; \quad (6.12)$$

$$M_n = 0,4 \cdot 0,75 \cdot 3451 = 1035,3 \text{ кг/доб.}$$

6.2.2 Заходи щодо обмеження негативного впливу випаровування паливо-мастильних матеріалів на атмосферне повітря та розрахунок циклону

Для очищення газоподібних та газопилових викидів з метою їх знешкодження або виключення з них дорогих та дефіцитних компонентів застосовують різне очисне обладнання і відповідні технологічні прийоми.

В даний час методи очищення запилених газів класифікують на наступні

групи:

I. "Сухі" механічні пиловловлювачі.

II. Пористі фільтри.

III. Електрофільтри.

IV. "Мокрі" пиловловлюючі апарати.

Механічні ("сухі") пиловловлювачі:

Такі пиловловлювачі умовно діляться на три групи:

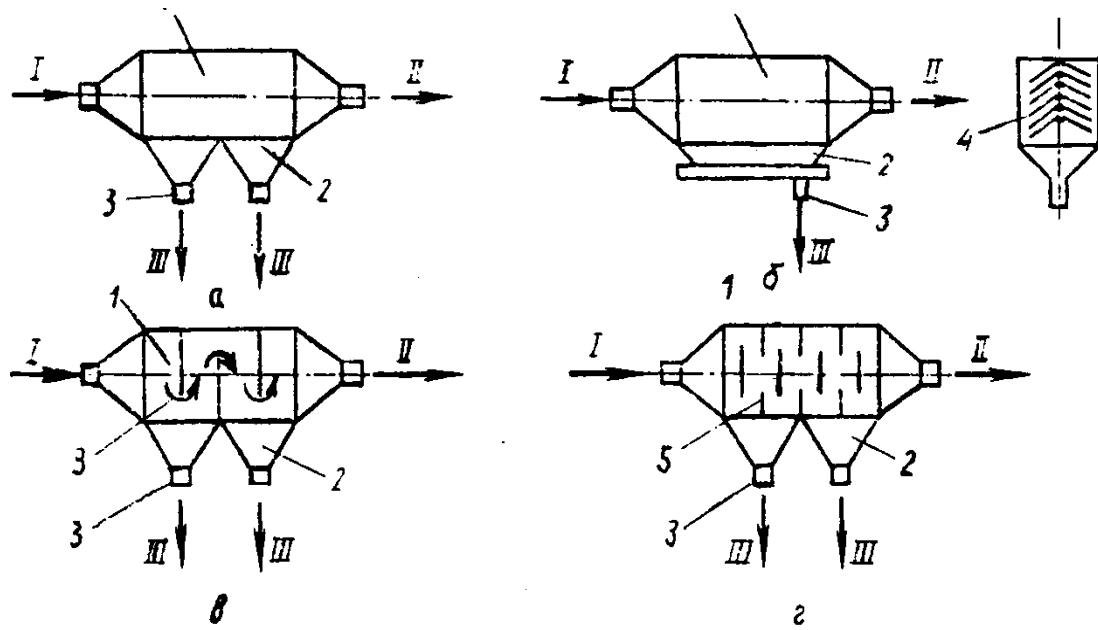
- пиłosідальні камери, принцип роботи яких заснований на дії сили тяжіння (гравітаційної сили);
- інерційні пиловловлювачі, принцип роботи яких заснований на дії сили інерції;
- циклони, батарейні циклони, пиловловлювачі, що обертаються, принцип роботи яких заснований на дії відцентрової сили.

Пиловловлююча камера є порожнистою або з горизонтальними полицями у внутрішній порожнині прямокутний короб, в нижній частині якого є отвір або бункер для збору пилу (рисунок 6.2).

У інерційних пиловловлювачах для зміни напрямку руху газів встановлюють перегородки (рисунок 6.3). При цьому разом з силою тяжіння діють і сили інерції. Пилі частинки, прагнучі зберегти напрям руху після зміни напрямку руху потоку газів, осідають в бункері. Газ в інерційному апараті поступає із швидкістю 5-15 м/с

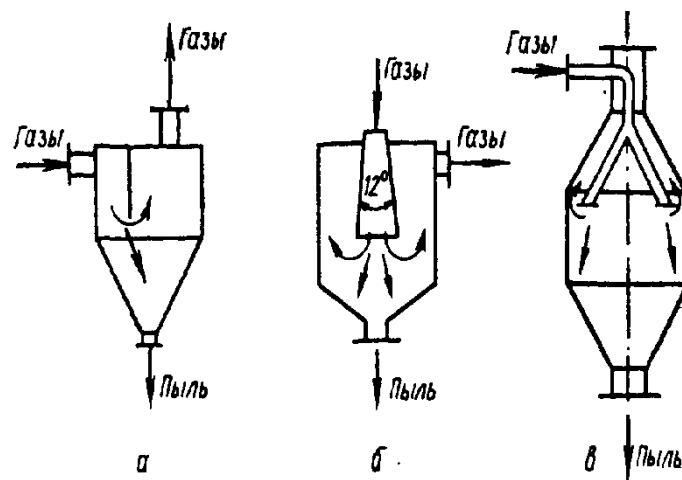
Циклони рекомендується використовувати для попереднього очищення газів і встановлювати перед вискоєфективними апаратами (наприклад, фільтрами або електрофільтрами) очищення.

Основними елементами циклонів є корпус, вихлопна труба і бункер. Газ поступає у верхню частину корпусу через вхідний патрубок, приварений до корпусу тангенціально. Уловлювання пилу відбувається під дією відцентрової сили, що виникає при русі газу між корпусом і вихлопною трубою. Уловлений пил зсипається в бункер, а очищений газ викидається через вихлопну трубу (рисунок 6.4)



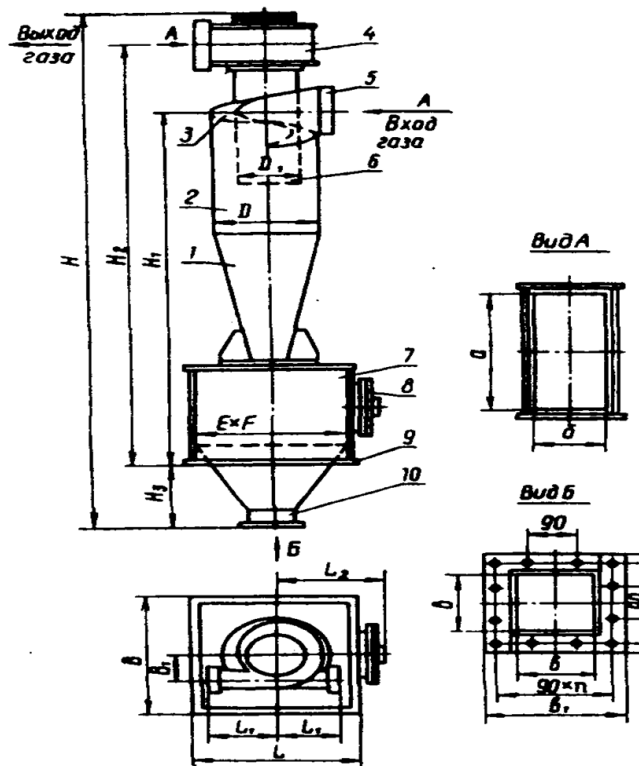
а – порожниста; б – з горизонтальними полицями;
в, г – з вертикальними перегородками; І – запилений газ;
ІІ – очищений газ; ІІІ – пил; 1 – корпус; 2 – бункер;
3 – штуцер для видалення; 4 – полиці; 5 – перегородки

Рисунок 6.2 - Пилоосідальні камери



а – камера з перегородкою; б – камера з конусом, що розширюється;
в – камера із заглибленим бункером

Рисунок 6.3 - Інерційні пиловловлювачі з різними способами подачі
і розподілу газового потоку.



- 1 – конічна частина циклону; 2 – циліндрична частина циклону;
 3 – гвинтоподібна кришка; 4 – камера очищеного газу; 5 – патрубок входу
 запиленого газу; 6 – вихлопна труба; 7 – бункер; 8 – люк; 9 – опорний
 пояс; 10 – пиловипускний отвір

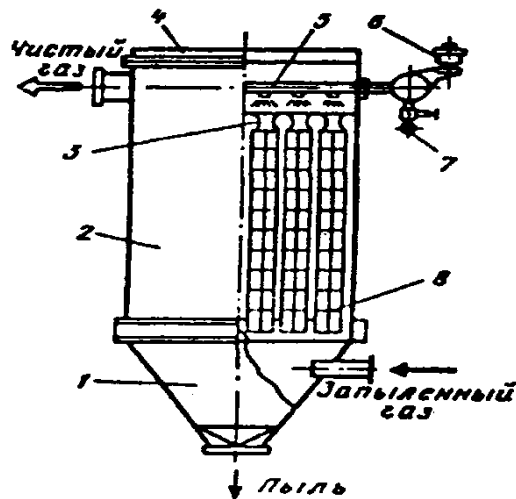
Рисунок 6.4 - Циклон типу ЦН-15П.

Пористі фільтри. Для очищення запилених газів все більшого поширення набуває, останнім часом, сухе очищення рукавними фільтрами. Ступінь очищення газів в них, при дотриманні правил технічної експлуатації, досягає 99,9 %.

Переважний розвиток отримали фільтри ФРКІ та ФРІ (рисунок 6.5). Швидкість фільтрування у цих апаратах на 20-30% вища, ніж у фільтрах з механічною регенерацією і зворотним продуванням. При ефективній регенерації (короткими імпульсами тривалістю 0,1-0,2 с загальний термін служби рукавів у цих фільтрах вищий, рукави менше зношуються. Гідравлічний опір зазвичай підтримується на рівні 1000-1500 Па. Умовне позначення типорозміру фільтру: Φ - фільтр; P - рукавний; K - каркасний; I - з

імпульсним продуванням; цифра після буквених позначень – активна поверхня фільтрації.

В процесі фільтрації запилений газ проходить через тканину закритих знизу рукавів всередину, виходить через верхній колектор і видаляється з апарату. Кожен рукав у фільтрі натягнутий на жорсткий каркас і закріплений на верхніх ґратках. Як матеріал, що фільтрує, використовують лавсан і фетр.



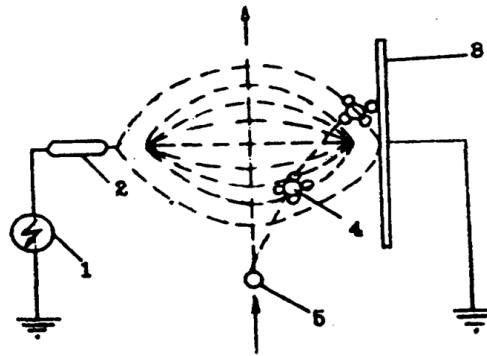
- 1 - бункер; 2 - корпус; 3 - дифузор-сопло; 4 – кришка; 5 - труба роздатня; 6 - секція клапанів; 7 - колектор стислого повітря;
8 - секція рукавів

Рисунок 6.5 - Фільтр ФРКІ (ФРІ).

Електрофільтри. Метод електроосадження (уловлювання пилу в електричному полі) полягає в наступному. Частинки пилу (або краплини вологи) спочатку отримують заряд від іонів газу, які утворюються в електричному полі високої напруги, а потім рухаються до заземленого осідального електрзаряду. Потрапивши на заземлений уловлювач, частинки прилипають і розряджаються. Коли осідальний електрод обростає шаром частинок, вони струшуються під впливом вібрації і збираються в бункері. Схема електричного осідання пилу представлена на рисунку 6.6.

Електрофільтри застосовуються для пиловловлювання в системах кондиціонування повітря.

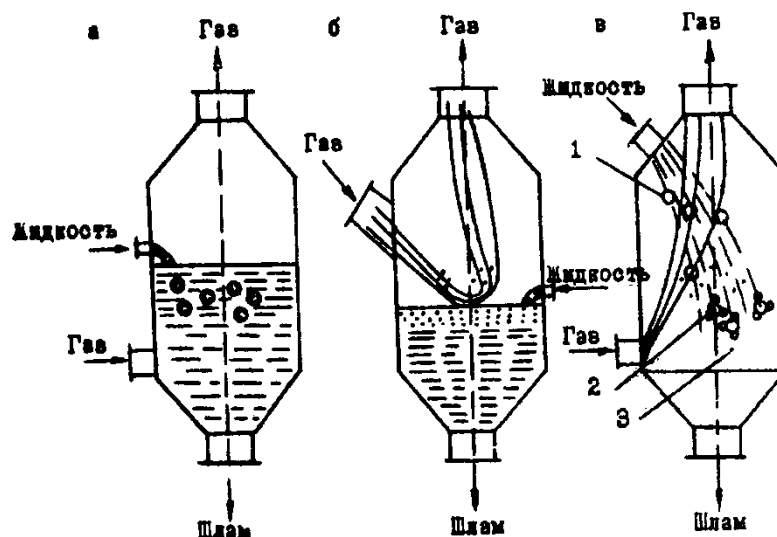
Апарати мокрого пилогазовловлювання. При очищенні газів від частинок пилу і для переробки газоподібних відходів з метою витяжки з них корисних компонентів або їх знешкодження успішно застосовуються методи і устаткування, засновані на принципах мокрого пиловловлювання.



- 1 – джерело електроживлення; 2 – коронуючий електрод;
3 – осідальний електрод; 4 – іон газу; 5 – частинки пилу

Рисунок 6.6 - Схема електричного осідання пилу.

Залежно від форми контакту фаз, способи мокрої пилоочистки можна поділити на: 1 – уловлювання в об'ємі (шарі) рідини; 2 – уловлювання плівками рідини; 3 – уловлювання розпиленою рідиною в об'ємі газу (рисунок 6.7).



- а – в об'ємі рідини; б – плівками рідини; в – розпорошеною рідиною;
1 – бульбашки газу; 2 – краплини рідини; 3 – тверді частинки

Рисунок 6.7 - Схеми основних способів мокрої пилоочистки

Проведемо розрахунок циклона для попереднього очищення забрудненого повітря перед надходженням його до атмосфери.

Приймаємо наступні вихідні данні:

- кількість газу, що очищається при робочих умовах – $Q_r = 10560 \text{ м}^3/\text{год} = 2,933 \text{ м}^3/\text{с}$;
- динамічна в'язкість газу при робочій температурі – $\mu_r = 7 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$;
- дисперсний склад пилу – $d_n = 40 \text{ мкм}$;
- запиленість газу – $C_{\text{вх}} = 5 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- щільність частинок – $\rho_{\text{ч}} = 4 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- стандартне відхилення величини – $\delta_{\text{ч}} = 0,35$;
- щільність газу при робочих умовах – $\rho_r = 0,68 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- необхідна ефективність очищення газу – $\eta = 0,8$.

Конструкцію циклона розраховуємо методом послідовних наближень в подальшому порядку.

Обираємо циклон СК-ЦН-34М та за таблицею 3. [20] визначаємо оптимальну швидкість газу в апараті $V_{\text{опт}}$, м/с

$$V_{\text{опт}} (\text{СК-ЦН-34М}) = 2,0 \text{ м/с}$$

Діаметр циклону D розраховуємо за формулою (6.13):

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V_{\text{опт}}}}; \quad (6.13)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,933}{3,14 \cdot 2}} = 1,36 \text{ м.}$$

Отриманий діаметр циклону округляємо до наближеного стандартного значення $D = 1,4 \text{ м}$

Відповідно до обраного діаметру циклону знаходимо за формулою (6.14) дійсну швидкість газу в циклоні:

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot n \cdot D^2} \quad (6.14)$$

де n - кількість циклонів

$$V = \frac{4 \cdot 2,933}{3,14 \cdot 1 \cdot 1,4^2} = 1,9 \text{ м/с.}$$

Швидкість газу в циклоні не повинна відхиляється більш ніж на 15% від оптимальної швидкості (6.15):

$$100 \times \frac{V - V_{\text{опт}}}{V_{\text{опт}}} < 15\%; \quad (6.15)$$

$$100 \times \frac{1,9 - 2}{2} < 15\%$$

$$5\% < 15\%$$

Дійсна швидкість в циклоні не відхиляється від оптимальної більш ніж на 15%, що відповідає одній з умов підбору циклонів.

Визначаємо параметр d_{50} - діаметр частинок реально осаджених з ефективністю 50% при робочих умовах за формулою (6.16). Значення параметра пилу d_{50}^T для циклону типу СК-ЦН-34М приймемо з таблиці 5 [38] $d_{50}^T = 1,3$.

$$d_{50} = d_{50}^T \times \sqrt{\frac{D}{0,6} \times \frac{1930}{\rho_{\text{ч}}} \times \frac{\mu}{22,2 \cdot 10^{-6}} \times \frac{3,5}{V}}; \quad (6.16)$$

$$d_{50} = 1,3 \times \sqrt{\frac{1,36}{0,6} \times \frac{1930}{4} \times \frac{7 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-6}} \times \frac{3,5}{1,9}} = 32,74 \text{ мкм.}$$

Згідно з умовами підбору циклону, отримане значення d_{50} має бути менше d_n (заданого дисперсного складу пилу, $d_n = 40$ мкм). так як в проведеному розрахунку ця умова виконаються, то не має необхідності обрати інший циклон з меншим значенням d_{50}^T .

Зробимо розрахунок параметра X за формулою (6.17):

$$X = 0,8 \lg \left(\frac{d_{50}}{d_{50}^T} \right); \quad (6.17)$$

$$X = 0,8 \lg \left(\frac{32,74}{1,3} \right) = 2,2.$$

За величиною параметра X визначаємо значення нормальної функції розподілу $\Phi(X)$. $\Phi(X)$ – це повний коефіцієнт очищення газу, виражений в частках, обчислюється за однією з формул, вибір якої залежить від одного з

додержуються умов:

- якщо $0 < X < 0,6$ то значення нормальної функції розподілу $\Phi(X)$ визначають за формулою (5.18);
- якщо $X > 0,6$, то значення нормальної функції розподілу $\Phi(X)$ визначають за формулою (5.19);

$$\Phi(X) = 0,3762X + 0,5. \quad (6.18)$$

$$\Phi(X) = 1 - \frac{1}{5,8X + 0,5}; \quad (6.19)$$

$$\Phi(X) = 1 - \frac{1}{5,8 \cdot 2,2 + 0,5} = 0,92.$$

Далі визначаємо ступінь ефективності очищення газу в циклоні за формулою (6.20):

$$\eta = \frac{1 + \Phi(X)}{2}; \quad (6.20)$$

$$\eta = \frac{1 + 0,92}{2} = 0,96.$$

Розрахунковий значення η більше заданого ($0,8 < 0,96$), що означає те, що циклон підібраний вірно.

Висновки до розділу 6

У цій частині дипломної роботи виконано наступне:

- розглянуто законодавство України щодо екологічної безпеки;
- проаналізовано склад шкідливих небезпечних речовин,;
- розглянуто будову та роботу засобів очищення стічних вод та атмосферного повітря;
- проведено розрахунок нафтопастки проекту 902-2-161 та проаналізовано ефективність її роботи по очищенню від забруднень;
- проведено розрахунок циклона для попереднього очищення забрудненого повітря перед надходженням його до атмосфери.

На основі виконаного робимо наступні висновки:

- охорону навколишнього середовища потрібно розглядати як комплекс міжнародних, державних, регіональних, локальних, адміністративно-господарських, технологічних і громадських заходів, спрямованих на збереження та забезпечення раціонального природокористування, відновлення, охорони та примноження природних ресурсів для блага людського суспільства і підтримання біологічного та екологічного рівноваги;
- найважливіші правила взаємодії природи і суспільства закріплені державою в законодавстві і стають обов'язковими для виконання і підтримки нормами права, які забезпечуються державним тиском у разі їх невиконання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У процесі виконання дипломної роботи:

- Проведений аналіз існуючих критеріїв оцінки зносостійкості матеріалів трибоспряжень.
- Проведений аналіз існуючих кінетичних моделей процесів, що мають місце при терті різних матеріалів.
- Проведений аналіз існуючих методик оцінки кінетичних критеріїв зносостійкості матеріалів трибоспряжень.
- Експериментально-розрахунковим методом, використовуючи структурно-енергетичний і матеріалознавський критерій оцінки зносостійкості конструкційних матеріалів при заданому мастильному матеріалі, визначили енергію активації поверхневого руйнування сталі ШХ 15 в середовищі палива ТС-1, яка становить $E^p=19,42$ кДж/моль;
- Порівняли отримані значення енергії активації кондиційного аівапалива ТС-1 з попередніми значеннями енергії активації палива ТС-1 довготривалого зберігання.
- За отриманими результатами трибокінетичного експеременту поповнили банк даних кінетичних параметрів та значень енергії активації поверхневого руйнування сталі ШХ 15 в паливі ТС-1 довготривалого зберігання.

СПИСОК БІБЛЮГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аксенов А.Ф. Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях.- М.: Машиностроение, 1977.- 147 с.
2. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров.- Л.: Химия, 1972.- 240 с.
3. Берникова Н.Б., Летин А.С., Усс Н.Н, Влияние температуры на показатели ресурса жидких смазочных материалов,- В кн.: триботехника - машиностроению: Тез.докл. II Всесоюз.науч.-техн.конф. (Пушино-на-Оке, нояб.1983 г.). М., 1983, с.33-34.
4. Бершадский Л.И. Основы теории структурной приспособляемости и переходных состояний трибосистем и ее приложение к задачам повышения надежности зубчатых и червячных передач: Автореф. дис.... д-ра техн.наук,- М., 1982.-48 с.
5. Богданович А.И. Кинетические и энергетико-активационные характеристики износостойкости и совместимости материалов трибоспряжений: Автореф. дис.... к-та техн. наук, - К., 1987.-23 с.
6. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей,- М.; Наука, 1981.- 128 с.
7. Буяновский И.А. Разработка температурно-кинетического метода определения характеристик процесса граничной смазки и выбор смазочных материалов: Автореф. дис.... д-ра техн.наук,- М., 1989.- 44 с
8. Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика.-М.: Мир, 1964.- 456 с.
9. Дедков А.К. Исследование взаимодействия газовой среды и поверхностей трения твердых тел (применительно к узлам трения ПТМ): Автореф.дис. ... канд.техн.наук,- М., 1975.- 16 с.
10. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел,- М.: Металлургия, 1971.- 264 с.

11. Елькин А.И. Использование проволочных тензодатчиков сопротивления при испытании в вакууме,- В кн.: Новые машины и приборы для испытаний металлов. М., 1962, с.92-93.
12. Елькин А.И. Некоторые проблемы трения полимеров,-В кн.: Применение материалов на основе пластмасс для опор скольжения и уплотнений в машинах. М., 1968, с.5-12.
13. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин /отв. ред. Ж.И.Алфёров.-Л.: Наука. ЛО, 1985.-112 с.
14. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механо-химические процессы при граничном трении.- М.: Наука, 1972.- 170 с.
15. КОСТЕЦКИЙ Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. и др. Поверхностная прочность материалов при трении.- К.: Техника, 1976.- 296 с.
16. Кулиев А.М., Сулейманова Ф.Г., Эльович И.И. Применение присадок для смазки промышленного оборудования.- Баку: Изд-во АН АзССР, 1969.- 174 с.
17. Лаврентьев В.В., Острейко К.К. К молекулярно-кинетической теории трения полимеров,- Механика полимеров,1967, №6. с.1125-1127.
18. Летин А.С. Ресурс жидких смазочных материалов,- В кн.: Триботехника - машиностроению: Тез.докл. II Все союз.науч.-техн. конф. (Пушино-на-Оке , нояб.1983 г.). М., 1983, с.33.
19. Марков А.А., Кичкин Г.И., Учуваткин Г.Н. Термоэнергетический анализ свойств граничных слоев,- В кн.: физико-химические основы смазочного действия; Тез.докл.Всесоюз.конф. (29-31 мая, 1979 г.). Кишинев, 1979, с.159-160.
20. Мельников В.Г. Влияние параметров трения на энергию активации трибохимического разложения смазочных материалов в зоне трения качения..- Трение и износ, 2001, т.22. № 5, с.567-574.
21. Некипелов Ю.Г., Терехин В.И., Хмыз Ю.М. Результаты межведомственных испытаний прибора УПС-01 для оценки противоизносных свойств реактивных топлив,- В кн.: Вопросы авиационной химмогологии. К., 1980, с.42-47.

22. Некоз А.И, Анализ кавитационно-эрозионного изнашивания как процесса коррозионно-механического разрушения.-Трение и износ, 1984, г. 5, № 4, с. 748-753.
23. Павлов В.А. Физические основы пластической деформации металлов,- М.: Изд-во АН СССР, 1962.- 200 с.
24. Панченков Г.М., Лебедев В.П. Химическая кинетика и анализ,- 2-е изд.перераб. и доп.- М.: Химия, 1974.- 592 с.
25. Подольский Й.Я., Цуркан И.Г., Корепова И.В., Самусенко И.В. Износ при граничной смазке,- В кн.: Трение, износ и смазочные материалы: Тр.междунар.науч.конф. (Ташкент, 22-26 мая, 1985 г.). Тез.секц.докл. в 3 томах. Т.2. Смазочное действие и смазочные материалы; триботехническое материаловедение; самоорганизующиеся явления фрикционного контакта, М., 1985, с.15-20.
26. Ратнер С.В., Лурье Е.Г. Истирание полимеров как кинетический термоактивационный процесс,- Докл.АН СССР, 1966, т.166, № 4, с.909-912.
27. Тихомиров В.П. Горленко О.А. Кинетическая модель трения твёрдых тел.- Трение и износ, 2000, т.21. № 2, с.121-127.
28. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей.- М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1945.- 424 с.
29. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов.-М.: Оборонгиз, 1946.- 424 с.
30. Шведков Е.Л., Ровинский Д.Я., Зозуля В.Д., Браун Э.Д. Словарь - справочник по трению, износу и смазке деталей машин.-К: Наук.думка, 1979.- 188 с.
31. Ясь Д.С., Подмоков В.Б., Дяденко Н.С. Испытания на износ. Методы и оборудование,- К: Техника, 1971.- 140 с.
32. Яцимирский К.Б. Кинетические методы анализа.-М.: Химия, 1967.-199 с.
33. Aronov V. Formation and destruction kinetics of transformed structures of metals in fractional contacts-Wear, 1976, Vol. 38. No 2, p. 305-310.

34. Aronov V. Kinetic characteristics of the transformation and failure of the surface layers of metal under dry friction.- Wear, 1977, Vol. 41, No 2, p. 205-212.
35. Grosch K.A. Relation between the Friction and Viscoelastic Properties of Rubber.- Nature, 1963, Vol. 197, No 4870, p. 856-859 (44-45).
36. Schallamach A. The velocity and temperature dependence of rubber friction.- Proc. Phys. Soc., sect. B, 1953, Vol. 66, pt. 5, No 401, p. 386-392.
37. Буріченко Л.А., Гулевець В.Д. Охорона праці в авіації: Підручник / За ред. Л.А. Буріченка. - К.: НАУ, 2003.- 448 с..
38. Стахов Е. А. Очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий хранения и транспорта нефтепродуктов.—Л.: Недра, 1983.—263 с..